

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1330 December 2016

群集の補完性の解析手法の開発と既存の底生生物データへの適用

細川 真也

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 生物多様性の重要性と3つのレベル	4
1.2 生物多様性と港湾事業との関係	4
1.3 本研究の目的	5
2. 港湾における群集の補完性の評価の課題	5
2.1 群集の補完性の評価の課題	5
2.2 観測種数に基づいた評価の注意点	6
2.3 港湾における群集の補完性の評価の方針	7
3. 群集の補完性の解析手法の開発	8
3.1 はじめに	8
3.2 解析手法の開発	8
3.3 群集構造が類似したデータセットへの手法の適用	9
3.4 まとめ	12
4. 尾道糸崎港松永港区における潮間帯の評価	13
4.1 はじめに	13
4.2 材料と解析方法	13
4.3 結果と考察	16
4.4 まとめ	17
5. おわりに	18
5.1 本研究のまとめ	18
5.2 港湾における生物多様性の研究の今後の課題	18
謝辞	18
参考文献	18
付録 A 生物多様性国家戦略と港湾環境政策	20
付録 B 生物多様性へ寄与する港湾事業の課題	21
付録 C 観測種数の比較における誤り	22
付録 D 希薄化曲線の種類と意味	23
付録 E 群集の補完性の評価のための調査方法	25

Development of a method for analysing complementarity of species assemblages and an application for the data of benthic marine animals obtained in a bay

Shinya HOSOKAWA*

Synopsis

Complementarity of species assemblages between communities retains high species richness in a region consisting of these communities. If intertidal zones have the complementarity against subtidal zones, which is mainly consisted in port area, we can increase the species richness in port areas by restoring intertidal zones. In this study I focused on species richness, the number of taxonomic groups, and developed a method for finding a community that have complementarity of species assemblages against other community. In addition, I analysed the data of benthic marine animals obtained in Matsunaga Bay to test whether intrtidal zones have the complementarity against subtidal zones or not.

Numbers of taxonomic groups shared between two communities and taxonomic groups occurring in a community but not in another community are important parameters for assessing complementarity of species assemblages. However, because the number of observed taxonomic groups depends on sampling effort, we cannot compare these numbers without understanding the response of these numbers to sampling effort. In this study I proposed a method for finding these numbers. First, we confirm the validity to compare communities at same or similar sampling effort by checking the response curves of number of taxonomic groups against sampling effort, rarefaction curves, in the communities. Second, the expected numbers of taxonomic groups shared between two communities and taxonomic groups occurring in a community are extracted by using a Monte Carlo technique. The method could work for data obtained in a natural field. As the first application of the developed method, the complementarity of species assemblages between these zones was found by using the data sets that have been obtained in a subtidal zone and an intertidal zone, in Matsunaga Bay, by past projects. This finding means that restoring intertidal zones in ports can contribute to increase biodiversity; that is, to increasing biodiversity initiative proposed in the national biodiversity strategy in Japan.

Key words: Species richness, Complementarity of species assemblages, Number of observed species, Rarefaction curve, Benthic marine animals, Effective use of data

* Senior Researcher, Marine Environmental Information Group
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5107, Fax : +81-46-844-1274 E-mail: hosokawa@pari.go.jp

群集の補完性の解析手法の開発と既存の底生生物データへの適用

細川 真也*

要 旨

固有の種が多くいる群集を有する場の複合により全体の種の豊富さ（種数）が高くなることを群集の補完性という。主に潮下帯によって構成されている港湾域においては、浅場等の潮間帯が群集の補完性を有していれば、環境へ配慮した港湾事業として浅場修復等を行うことで、港湾の種の豊富さを向上させることができる。本研究では、種の豊富さに着目し、港湾において群集の補完性を有する場を見出すための評価手法を開発し、さらに、過去の事業によって得られた底生生物に関する既存のデータを活用してその手法を適用し、群集の補完性を有する場を見出すことを目的としている。

群集の補完性の評価においては、群集間で共通する種および各群集の固有の種の数を観測することが重要となる。しかし、観測種数は、調査の努力量（サンプリングエフォート）に依存する性質があり、サンプリングエフォートに対する観測種数の応答を理解せずに、群集間の種数の比較を行うことはできない。本研究では、群集の補完性の評価手法として、まず、各群集データについて希薄化曲線を描き、同じもしくは同等のサンプリングエフォートの下で群集間の比較可能性を確認した上で、群集間で共通する種および各群集の固有の種数を解析する手順を提案した。さらに、同じもしくは同等のサンプリングエフォートの下で、これらの数を求める解析手法を開発した。この評価手法の妥当性について、実海域で得られた既存のデータを解析することで検証した。最後に、本研究で開発した手法を用い、尾道糸崎港の松永港区において過去の調査によって得られた既存データを用いて、潮下帯および潮間帯の群集構造の違いを評価した。この結果、潮間帯は潮下帯と群集を補完する関係にあり、港湾全体の種の豊富さを高めていることが明らかとなった。この結果は、主として潮下帯によって構成される港湾区域において、潮間帯を浅場修復として造成することは生物多様性の強化につながることを示唆している。

キーワード：種の豊富さ、群集の補完性、観測種数、希薄化曲線、底生生物、既存データの活用

* 海洋情報・津波研究領域海洋環境情報研究グループ 主任研究官
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5107, Fax：046-844-1274 E-mail: hosokawa@pari.go.jp

1. はじめに

1.1 生物多様性の重要性と3つのレベル

生物多様性の保全は、生態系機能の保全にもつながるものと考えられている^{1),2)}。特に、生態系機能のうち人類に役立つものは生態系サービスと呼ばれ、生物多様性の保全は、生態系サービスの確保のためにも重要である。

生物多様性条約では、生物多様性について、生態系の多様性、種の多様性、種内における遺伝子の多様性の3つのレベルがあるとしている²⁾。生態系の多様性とは、干潟、サンゴ礁、藻場等の様々なタイプの生態系が形成されていることであり、種の多様性とは、いろいろな動物や植物等が生息・生育していることである。遺伝子の多様性は、種内において遺伝子レベルで違いがあることである。

1.2 生物多様性と港湾事業との関係

(1) 港湾事業における浅場修復と生物多様性

生物多様性国家戦略²⁾では、我が国の主要行動目標の一つとして、「2020年までに自然生息地の損失速度が少なくとも半減、また、可能な場合にはゼロに近づき、また、自然生息地の劣化・分断を顕著に減少させるため、生態系ネットワークの形成や湿地、干潟の再生等必要な取組を行う」こととしている（付録A）。また、港湾環境政策³⁾においても生物多様性は重要なキーワードの一つであり、その課題として、干潟や藻場等の浅場の保全や修復による生物多様性の維持・回復、もしくは強化が考えられる（付録A）。

港湾事業等においては、環境への配慮として、干潟、藻場、磯場等の浅場（図-1.1）が修復されることがある。例えば、2005年2月にとりまとめられた「瀬戸内海環境修復計画」^{4),5)}では、瀬戸内海において、20年後を目標年次とした約600

haの浅場修復を目標量として掲げている。この計画においては、生物多様性に関する目標は掲げられていないものの、浅場修復の目標量を達成することにより、同時に生物多様性の回復もしくは強化にも貢献できる可能性がある。

(2) 種の多様性の概念と空間スケール

本研究では、生物多様性の3つのレベルのうち、種の多様性に焦点を当て、港湾域全体で種の多様性の保全もしくは向上を目標とする。

種の多様性の概念には、種の豊富さと均等度がある。種の豊富さは種数のことであり、均等度は種がどれくらい同じ割合で存在するかを意味する指標である^{1),6)}。種の豊富さが、群集（異種の個体群の集まり⁶⁾）の多様性を表す最も単純で、理解しやすい指標であることから⁷⁾、本研究では、種の豊富さのみを対象とする。

種の多様性には、 α 多様性、 β 多様性、 γ 多様性の3つの空間スケールがあり^{1),6)}、港湾施設や浅場で構成される港湾域全体（図-1.1）の種の多様性の保全もしくは向上を目標とする上では、これらの理解は欠かせない。 α 多様

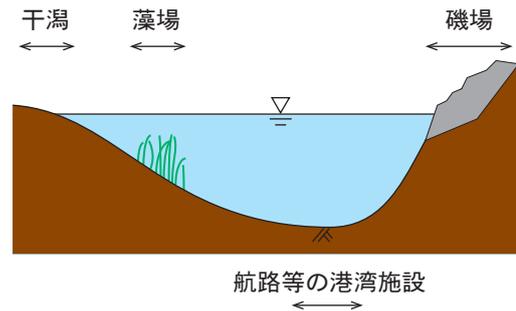


図-1.1 港湾内における港湾施設と浅場の空間イメージ

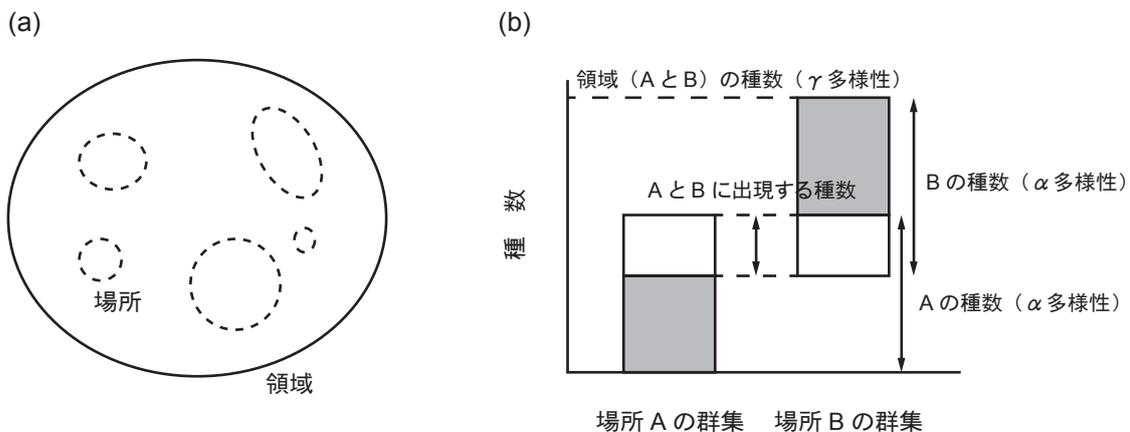


図-1.2 種の多様性の空間スケールの概念図。(a) 本研究における空間的な用語の定義と (b) 種の多様性の尺度として種数を用いた場合における種の多様性の空間スケールの3つの区分。

性と γ 多様性は、それぞれ、局所のおよび広い地理的規模の中での種の多様性のことである¹⁾⁶⁾。港湾内に浅場が存在する空間では、「局所的な規模」と「地理的規模」は、それぞれ、港湾施設や干潟・藻場等とそれらを含む港湾域全体と考えることができる。港湾施設や干潟・藻場等を「場所」、港湾域全体を「領域」と想定し（図-1.2a）、さらに、種数による一次的な尺度を用いれば、2つの場所を含む領域における α 多様性と γ 多様性は、それぞれ、場所における種数および領域全体における種数となる。 β 多様性は、各場所の群集間の種の固有性の変化として定義される⁷⁾。 β 多様性のうち、特に、各場所の群集に固有の種が多く、 γ 多様性が高くなる性質は、群集の補完性と呼ばれる。2つの場所の群集に補完性があれば、たとえ α 多様性が同じ大きさであっても、 γ 多様性は α 多様性よりも高くなる（図-1.2b）。群集の補完性は、保全すべき場所を選択する上で重要となる⁸⁾⁹⁾。

1.3 本研究の目的

港湾域において保全すべき場所を選定する際、あるいは、浅場修復計画を立案する際に群集の補完性についての知見を有していれば、港湾域全体の種の豊富さの維持もしくは向上を目標とした案の検討が可能となる（付録 B）。このことより、本研究では、群集の補完性に着目し、港湾における浅場の種の多様性への寄与に関する知見を得るための評価および解析手法の開発を行い、さらに、その手法を適用して、実海域における浅場の種の多様性への寄与に関する知見を得ることを目的とする。

本論文では、まず、第 1 章で生物多様性と港湾事業との関係を説明し、群集の補完性に着目する重要性を説明した。第 2 章以降では、群集の補完性の評価手法を開発し、実海域へ適用する。具体的には、第 2 章において、群集の補完性の評価における課題を整理し、第 3 章では、群集の補完性の評価を行うための解析手法を開発する。第 4 章では、

過去の港湾事業等によって得られた底生生物のデータに対して開発した手法を適用し、港湾における浅場の生物多様性への寄与に関する知見を得る。

2. 港湾における群集の補完性の評価の課題

2.1 群集の補完性の評価の課題

(1) はじめに

群集の補完性は、 β 多様性の性質の一部であることから、本節では、まず、既存の β 多様性の評価方法を整理する。その上で、群集の補完性を評価するためには、 β 多様性の評価だけでは十分ではなく、群集間に共通する種および各群集に固有の種を数えることが重要であることを示す。

(2) β 多様性の評価方法

β 多様性を評価するための古典的な尺度には、例えば、以下の 2 つがある⁸⁾：

$$\beta_W = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (1)$$

$$\beta_{Add} = \gamma - \bar{\alpha} \quad (2)$$

ここに、 $\bar{\alpha}$ は種数の群集間の平均 (α 多様性の平均)、 γ は領域全体の種数 (γ 多様性) である。 β_W は γ 多様性の α 多様性に対する大きさの比を表す無次元数である。 β_{Add} は γ 多様性と α 多様性の差であり、種数の次元を持つ。

これらの古典的な尺度の他、 β 多様性の評価にはいくつかの指数がある。例えば、Jaccard 指数 (J) は、以下である：

$$J = \frac{a}{a+b+c} \quad (3)$$

ここに、 a 、 b 、 c は、それぞれ、2つの群集間で共通する種数、一方の群集のみで出現する種数、もう一方の群集のみで出現する種数である。Jaccard 指数は、0 から 1 までの値を取

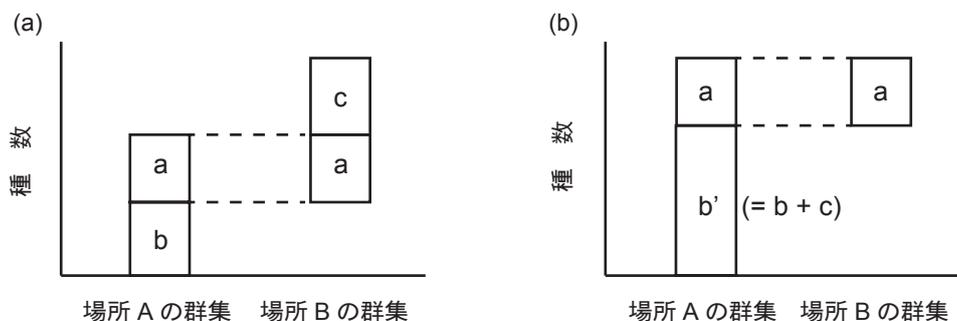


図-2.1 領域全体の種数と場所間の平均種数が同じ2つの場合。(a) 場所 A と場所 B の群集が補い合っている場合と (b) 場所 A の群集が場所 B の群集を包含している場合。これらの Jaccard 指数は同じである。

り、群集間で類似した構造を有しているほど大きな値を取る。なお、 $\gamma = a + b + c$ であること、 $\bar{a} = (2a + b + c)/2$ であることから、 $J = 2/\beta_W - 1$ が導かれ、Jaccard 指数は無次元数である β_W の尺度の一つであることが理解できる⁷⁾。

(3) β 多様性と群集の補完性の評価方法の違い

β 多様性の評価方法は、群集間の関係を理解しやすくする利点を有しているが、共通種数と固有種数の情報が落とされており、これが群集の補完性の評価においては問題となる。

この理由を説明するため、ここでは、場所 A と場所 B からなる領域で Jaccard 指数は同じであるものの、それぞれの群集構造が異なる 2 つの場合を考える。一つは、場所 A と場所 B の群集が互いに補い合っている場合である (図-2.1a)。もう一つは、場所 A の群集が場所 B の群集を包含している場合である (図-2.1b)。前者の場合、場所 A の一部を場所 B に置き換えれば、領域全体の種数は増える。しかし、後者の場合、場所 A の一部を場所 B に置き換えても、全体の種数は置き換える前のままであり、むしろ、全体の均等度が劣化する。後者は、明らかに群集を補い合っていないものの、Jaccard 指数を用いれば、これら 2 つの場合は同じであると評価される。この例は、群集の補完性の評価においては、Jaccard 指数だけを用いるのは不十分であり、共通種数と固有種数を評価することの重要性を示している。

共通種数と固有種数は、群集を観測することによって評価される。ただし、観測種数は、サンプリングされる個体数や面積の大きさ (サンプリングエフォート) や観測する群集の構造に強く依存することから、観測種数の特性を理解し

なければ、これらを正しく評価することはできない。

2.2 観測種数に基づいた評価の注意点

(1) 観測種数の特性の理解

a) 観測種数のサンプリングエフォート依存

個体ごとの群集の観測は、群集に含まれる生物をすべて一つの袋に入れて、そこから無作為に 1 個体ずつサンプリングし、サンプリングされた個体は袋へ戻さない場合 (非復元抽出) としてモデル化することができる (図-2.2a)。

通常、群集に含まれる種の数はいわゆる個体数の少ないものの方が多いことから、観測種数はサンプリングの初期に大きな勾配で増える。しかし、サンプリング回数の増加に伴って、既に観測された種が多くなり、逆に、新しい種が観測されにくくなることから、観測種数の増加の傾向はなだらかになる (図-2.2b)。このように、観測種数は、サンプリングエフォートへ強く依存し、群集に含まれる個体数 N までサンプリングしなければ、真の種数 S を観測できない。

サンプリング回数の増加によって観測種数が増加する曲線は累積曲線と呼ばれる。一方、希薄化曲線と呼ばれる曲線もある。希薄化曲線は、すべてのサンプルから一部のサンプル (N_{obs}) を抽出して、サンプリング回数 N_{obs} における平均観測種数を求めることによって描かれる。この曲線の名称は、累積曲線とは逆に、サンプリング回数を総サンプル数から小さい方へ種数の期待値を求める操作によって描かれることから付けられている¹⁰⁾。サンプリング回数 N_{obs} が小さい範囲においては、希薄化曲線は累積曲線の期待値として見ることもできる¹⁰⁾。

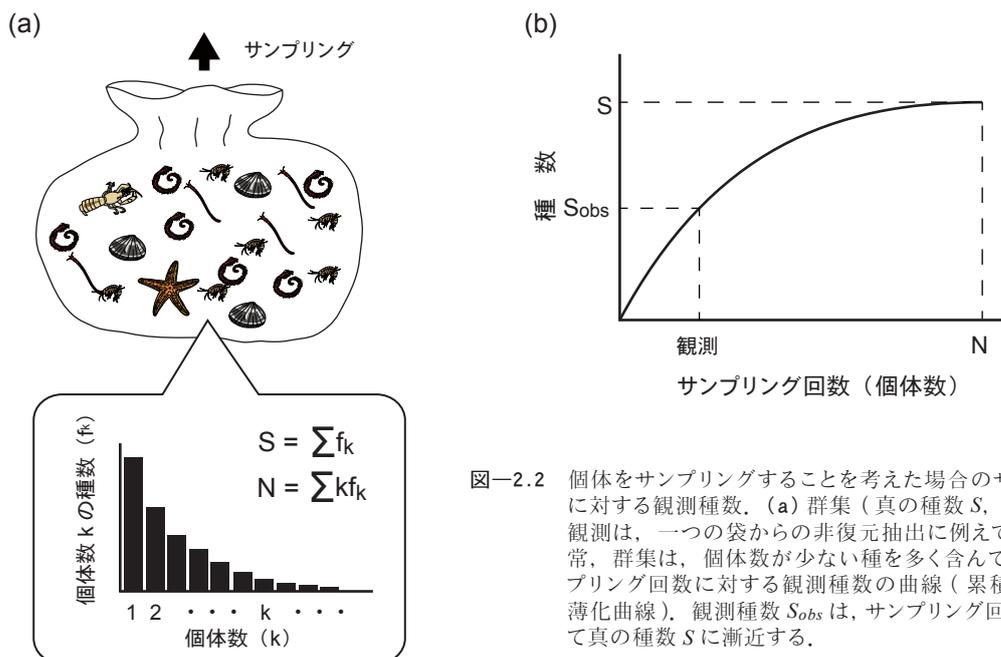


図-2.2 個体をサンプリングすることを考えた場合のサンプリング回数に対する観測種数。(a) 群集 (真の種数 S , 総個体数 N) の観測は、一つの袋からの非復元抽出に例えて考えられる。通常、群集は、個体数が少ない種を多く含んでいる。(b) サンプリング回数に対する観測種数の曲線 (累積曲線もしくは希薄化曲線)。観測種数 S_{obs} は、サンプリング回数の増加に従って真の種数 S に漸近する。

b) 観測種数の群集構造への依存

観測種数は群集構造にも依存する。例えば、群集に含まれる種がすべて1個体しか含まれていなければ、サンプリング回数の増加に従って、観測種数は直線的に増加する。一方、群集に含まれる一つの種が複数個体いる場合、その種の観測種数への貢献は、最初の1個体がサンプリングされた時のみであり、2個体目以降がサンプリングされても観測種数は増えない。この傾向を希薄化曲線として描いた場合、希薄化曲線の形状は、観測する群集に含まれる生物の分布、すなわち、群集構造によって異なる。

c) 観測種数の比較における注意点

観測種数のサンプリングエフォートと群集構造への依存を理解しなければ、誤った観測種数の比較をしてしまう可能性がある(付録C)。観測種数の比較における誤りは、希薄化曲線を描き、同じもしくは同等のサンプリングエフォートの下で、観測種数が比較可能であることを確認することで回避できることが多い¹⁰⁾。

(2) 評価目的に応じた希薄化曲線の選択

群集のサンプリングは、個体ごともしくは枠取りによる群集ごとに行われることから、希薄化曲線には、サンプリング回数に対するものとサンプリング面積に対するものが存在する。これらの希薄化曲線の選択は、観測種数の評価目的に応じて行われるが、その選択を誤れば間違った評価をしてしまう場合もある¹⁰⁾。このため、観測種数を用いて評価する目的を事前に明確にすることが重要である。

2.3 港湾における群集の補完性の評価の方針

(1) 希薄化曲線による群集間の比較可能性の検討

群集の補完性の評価においては、観測結果から群集間に共通する種および各群集における固有の種を抽出することが最初のステップとなるが、観測種数のサンプリングエフォートと群集構造への依存特性を考慮しなければならない。本研究では、観測群集間において同じもしくは同等のサンプリングエフォートで比較可能であることを確認するため、希薄化曲線を描いて観測種数の特性を把握し、群集間に共通する種および各群集における固有の種の抽出を行う方針とする。ただし、群集間の希薄化曲線がどのような形状であれば比較可能であるかの判断方法については、第3章で考察する。

(2) 解析に用いる希薄化曲線の選択

本研究では、港湾における種の豊富さの維持もしくは向上を目標とした浅場の保全および修復方法の検討を可能にするを背景としていることから、サンプリング面積に対する希薄化曲線を用いることが適している(付録D)。

サンプリング面積に対する希薄化曲線は、種密度を評価していることになる。この種密度には、サンプリングされた面積当たりの種密度と領域当たりの種密度の2つのタイプがあるものと考えられ、それぞれ、適した評価対象が異なることから(付録D)、どちらの種密度を解析に用いるか選択しなければならない。港湾における浅場は面積の割合として希少であることから、本研究では、希少な場所の保全の検討に適したサンプリングされた面積当たりの種密度を対

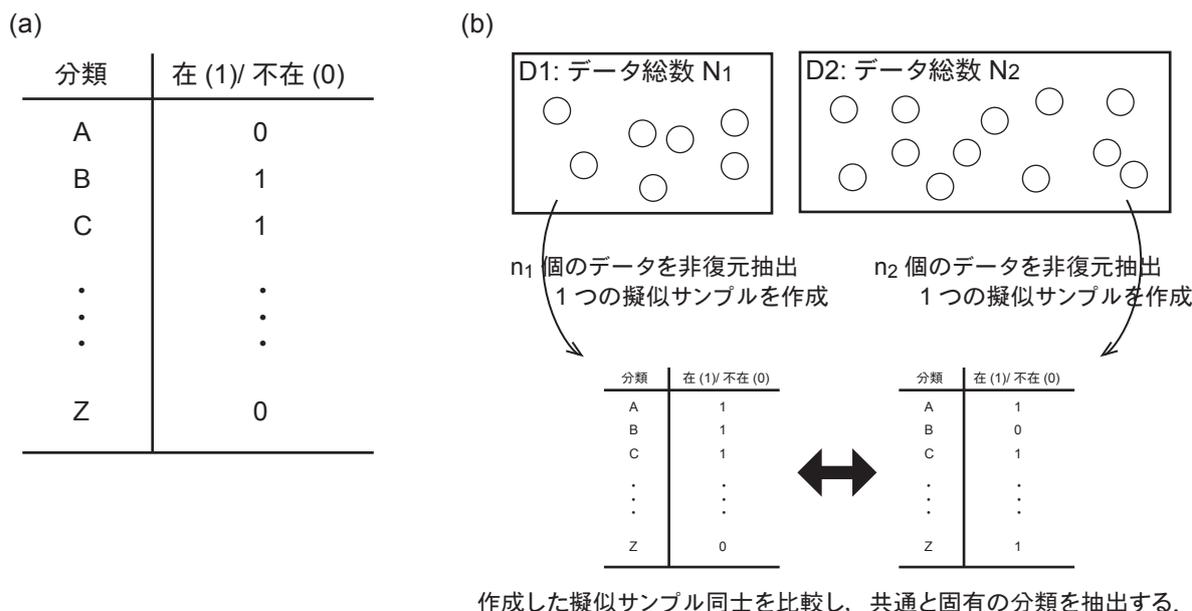


図3.1 群集の補完性の解析方法のイメージ図。(a)一つのデータの配列と(b)2つのデータセット(D1とD2)の間での群集の補完性の解析方法。種を対象とする場合、図中の「分類」を「種」に置き換えることになる。

表-3.1 尾道糸崎港海老地区における2001年と2004年の底生生物調査の方法と群集の補完性の解析のためのデータ抽出数。サンプリング方法は1データ当たりのサンプルの採取方法を意味している。

データセット名	調査年	サンプリング方法 (縦×横×深さ×回数)	ふるい目	データ数	抽出数
D1	2001年	コドラート (0.25 m×0.25 m×0.20 m×2)	1 mm	7	n
D2	2004年	コドラート (0.25 m×0.25 m×0.20 m×1)	1 mm	12	2n

象とすることが適していると考えられる。

3. 群集の補完性の解析手法の開発

3.1 はじめに

前章で示した港湾における群集の補完性の評価の方針を実現するため、希薄化曲線の描き方を説明し、群集の補完性を評価する手法を開発する。開発した手法は、実海域で得られたデータに適用することで、その妥当性を確認する。

なお、本研究では、種の多様性を対象としているものの、必ずしも種のみを解析対象とするわけではない。ここで開発する手法は、種のレベル以外の分類群についても適用できる手法であることから、本章では、記述を「種」ではなく「分類」とする。

3.2 解析手法の開発

(1) 希薄化曲線

面積SUのサンプリング方法によって得られたデータがある場合、n個のデータから成るサンプリング面積SAは以下である：

$$SA = SU \times n, \quad (4)$$

各データが分類の名称とその在・不在の記録によって構成されているとすれば (図-3.1a)，このn個のデータに在

として記録される分類を数え上げればサンプリング面積SUに対する分類の数が求まる。n個のデータの組み合わせが複数ある場合、非復元抽出による試行を行えば、サンプリング面積SAにおける分類数を求めることができる。この試行をモンテカルロシミュレーションにより複数回行えば、分類数の確率分布およびその期待値を得ることができ、希薄化曲線を描くことができる。

(2) 共通する分類および固有の分類の数

ここでは、仮に、比較対象の群集のデータセットをD₁とD₂とし、これらデータセット間では、同じもしくは同等のサンプリング面積で比較可能とする。

それぞれのデータセットに含まれるデータは面積SU₁とSU₂のサンプリングによって得られ、データ総数はN₁個とN₂個とする。次に、N₁およびN₂以下の正の整数で、以下の関係を満たすn₁とn₂を決め、各データセットから、これらの数のデータを非復元抽出でランダムに抽出し、抽出されたデータを結合することで擬似的な群集サンプルデータを作成できる (図-3.1b)：

$$SU_1 \times n_1 = \text{or} \approx SU_2 \times n_2, \quad (5)$$

この擬似的な群集サンプルデータから、共通する分類および固有の分類を抽出する。この試行を1回だけ行っただけでは、抽出結果に偏りが生じることから、モンテカルロシミュレーションにより複数回の試行を実施することで、偏りを回

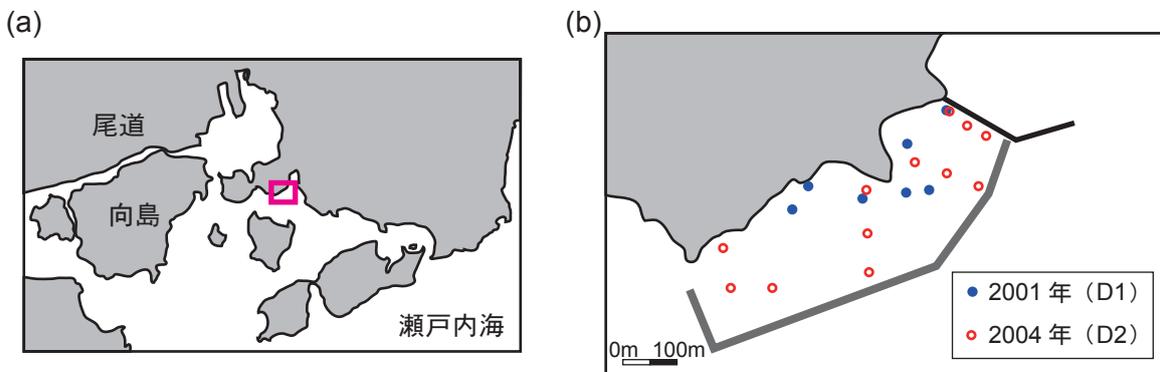


図-3.2 尾道糸崎港海老地区。(a) 海老地区の場所および (b) 海老地区内におけるサンプリングの地点。

避した共通分類数および固有分類数を求める。

3.3 群集構造が類似したデータセットへの手法の適用

(1) 材料と方法

a) 解析対象のデータ

国土交通省中国地方整備局管内の瀬戸内海において過去の港湾事業等によって得られた底生生物の調査結果が、データベースとしてとりまとめられている¹¹⁾。

広島県にある尾道糸崎港の海老地区（図-3.2a）においては、1988年および1989年に干潟造成が行われて以降、底生生物の追跡調査が行われている。その追跡調査のうち、2001年と2004年に実施された調査結果^{12),13)}が、データベースに収録されている。

本節では、これらのデータセットを対象として、データセット間に共通する分類および各データセットの固有の分類を抽出する。これらの調査は同じ干潟内で実施されていることから（図-3.2b）、適度な割合の共通および固有の分類が含まれ、開発した手法による解析結果を確認するための題材として適していると考えられる。また、それぞれのデータセットには複数のデータが含まれており（表-3.1）、同じサンプリング面積となる複数の組み合わせがある。このため、複数のサンプリング面積の下で、共通・固有の分類の数を求めることができる。すなわち、サンプリング面積の違いが解析結果に与える影響を把握することが可能であり、群集間の比較可能な判断方法を検討する題材として適している。ただし、2001年のサンプリング地点は、2004年の地点に比べて岸に偏っていることから、これらの比較をしても2つの年の群集を比較したことにはならない。この点に注意し、2001年のデータセットをD1、2004年のデータセットをD2として解析を実施する。

b) 解析対象とする分類群

生物は、階層的に分類され、その分類群には、例えば、門・綱・目・科・属・種がある。底生生物の「種」の分類の精度は、同定する者の同定技能に依存するため、複数の者によって同定された結果が収録されているデータベースの解析においては、同定精度の統一性に注意する必要がある。

分類レベルが上位の群集構造は、「種」と異なる傾向を示すようになることから¹⁴⁾、「種」の代わりに解析することに注意が必要となる。しかし、分類レベルが「科」であれば、その解析結果は、「種」と同様の解釈をすることが可能である¹⁴⁾。また、分類精度の同定技能への依存性は低く、同定精度の統一性に特別な注意を払う必要はないと考えられる。

本研究では、生物多様性に期待される機能は、必ずしも「種」の分類レベルにこだわる必要はないと考え、さらに、データの取り扱いやすさと解釈への影響から、「科」を

解析対象の分類レベルとした。なお、生物の分類の方法は、World Register of Marine Species (WoRMS)¹⁵⁾に統一した。

c) 群集の補完性の解析

尾道糸崎港の海老地区における2001年と2004年の両方の調査における生物試料は、0.25 m×0.25 mのコドラート（平面の方形枠）から0.2 mの深さの底泥を採取し、1 mm目のふるいに残ったものから得られている^{12),13)}。2001年の調査においては、一つの地点において2回採取した試料を群集データとして記録し、2004年の調査においては1回採取した試料を記録していることから（表-3.1）、1回当りのサンプリング面積は、2001年の方が2004年に対して2倍大きい。このため、サンプリング面積を同じにするためには、 n_1 が n の場合に n_2 を $2n$ とする必要がある。

希薄化曲線は、 n_1 を1から7まで、 n_2 を1から12まで変動させて、各サンプリング面積につき1,000回のモンテカルロシミュレーションにより求めた科数の平均、最大値および最小値から作成した。

データセット間の共通科および各データセットの固有科の抽出については、 n_1 を n 、 n_2 を $2n$ とした組み合わせにつき、1,000回のモンテカルロシミュレーションを実施していき、それらの数の平均、最大値、最小値を求めた。この過程を、 n について、1から6まで（ n_2 について、2から12までの偶数）で実施した。

上記の解析について、すべての動物門に含まれる科を対象とした場合、環形動物門、軟体動物門、節足動物門、その他の動物門に含まれる科のみを対象とした場合に分けて実行した。本章のすべて解析については、R言語¹⁶⁾を用いてプログラムを記述し、実行した。

d) サンプリング面積に対する群集の補完性解析の感度

群集の補完性の解析結果のサンプリング面積に対する感度を調べるため、 n_1 を4（ n_2 換算で8）に固定し、 n_2 について、1から12まで変動させて、比較間のサンプリング面積が異なる場合におけるデータセット間の共通科数および各データセットの固有科数を解析した。解析は、1,000回のモンテカルロシミュレーションにより実施し、平均、最大値、最小値を求めた。この解析については、R言語¹⁶⁾を用いてプログラムを記述し、実行した。

(2) すべての科を対象とした解析結果と考察

a) 希薄化曲線の比較

希薄化曲線の形状は、データセット間で類似している（図-3.3a）。このことから、D1とD2における希薄化曲線の形状の群集構造への依存性に大きな差はないものと判断できる。

単純なデータセット間の科数の比較において、どの程度のサンプリング面積の差であれば比較することが許容されるのかについても、希薄化曲線から考察することが可能であ

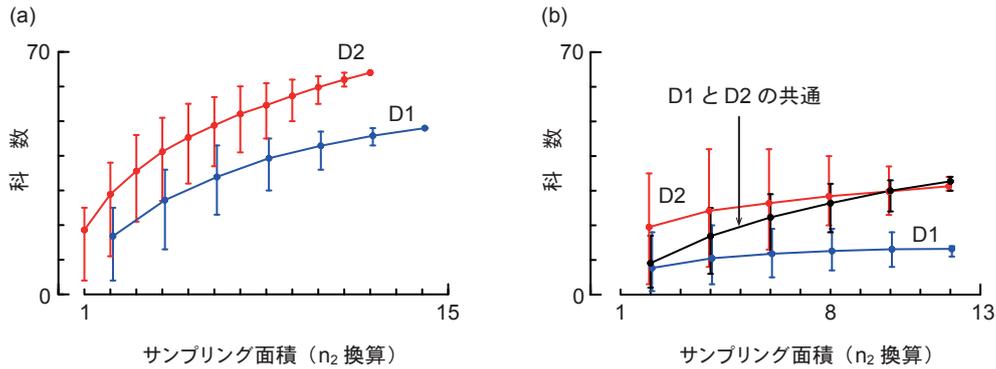


図-3.3 尾道糸崎港海老地区の2つのデータセットにおける底生生物を対象とした群集の補完性の解析結果。(a) サンプル面積に対する科数の希薄化曲線と(b) データセット間で共通する科数および各データセットに固有の科数の解析結果。共通科数および固有科数は、同じサンプル面積の擬似サンプル間を比較した解析結果を示している。エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している。

る。解析対象のデータセット間では、希薄化曲線より、明らかに D2 の方が科数が大きい。例えば、 n_1 が 4 (n_2 換算で 8) の場合、D2 のサンプル面積が厳密に D1 と同じでなくても n_2 が 8 近傍であれば、D2 の科数と比較しても大きな違いはない。しかし、 n_1 が 4 の場合の科数と n_2 が 3 以下の D2 の科数と比較してしまえば、科数の大小関係が逆転してしまい、最も単純な誤り(付録 C)をする可能性があることが分かる。

b) 群集の補完性の解析結果と感度

データセット間の共通科数と各データセットの固有科数は、サンプル面積に対して増加傾向を示している(図-3.3b)。しかし、サンプル面積の違いに対する抽出対象の科数の感度は異なる。共通科数は、 $n_2 = 2$ において 9.1、 $n_2 = 12$ において 32.7 であり、サンプル面積が 6 倍になることで 3 倍に増えている。一方、D2 において、 $n_2 = 2$ で 19.5、 $n_2 = 12$ でその約 1.5 倍程度の 31.3 であり、共通科数の増加傾向より緩やかである。D1 の増加傾向も共通科数の増加傾向に比べて緩やかである。これらの比較は、たとえ同じサンプル面積で共通科数および固有科数を抽出したとしても、その比較の解釈には十分な考察が必要であることを意味している。

比較するデータセット間のサンプル面積に差があれば、共通科数および固有科数の抽出結果は異なる。D1 に対する D2 のサンプル面積が大きくなるに従い(図-3.4 の右方向)、D1 の固有科数は減少し、D2 の固有科数は増加する。D1 のサンプル面積は固定していることから、横軸方向に群集の規模に変化はないものの、D2 の群集の規模は横軸の右方向へ向かって大きくなることから、この原因は容易に理解できる。D1 の固有科数が横軸の右方向へ向かって減少する原因は、D2 の群集の規模が大きくなるに従って、固有科ではなく共通科として抽出されるものが増え

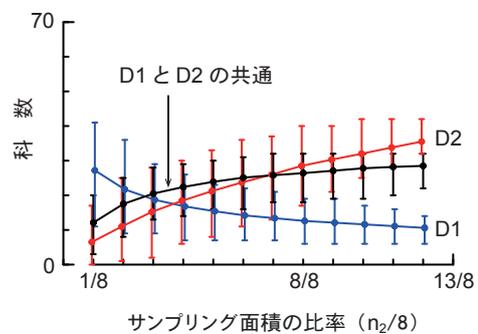
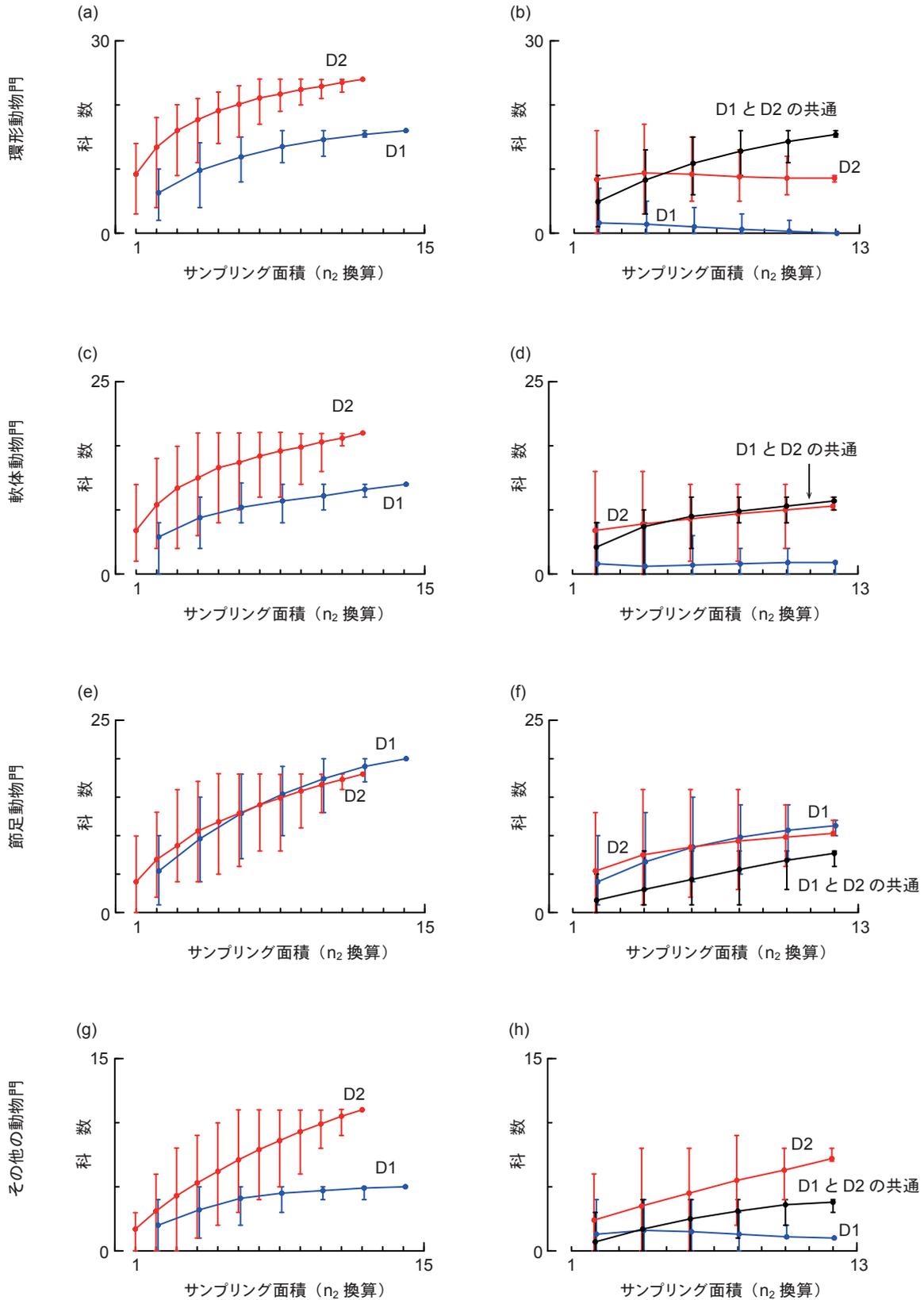


図-3.4 尾道糸崎港海老地区の2つのデータセットにおける底生生物を対象とした群集の補完性の解析結果の感度。D1 のサンプル面積を固定し ($n_1 = 4$; $n_2 = 8$ に相当)、D2 のサンプル面積を変動させた場合の共通科数および固有科数を示している。サンプル面積の比率が 1 ($8/8$) の場合の結果は、図-3.3(b) における n_2 が 8 の場合の結果と同じである(ただし、数値解であるため、完全には一致していない)。エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している。

るためである。

さらに、比較するデータセット間のサンプル面積に差が大きくなれば、データセット間での比較はできなくなる。D2 のサンプル面積が D1 に対して同程度である場合、データセット間の共通科数も固有科数も同じサンプル面積で比較した場合(図-3.3b における $n_2 = 8$) と大きな違いはない。しかし、D2 のサンプル面積が D1 に対して $3/8$ 以下であれば、D1 の固有科数の方が D2 の固有科数よりも多くなってしまい、抽出結果が逆転してしまう。

D1 の固有科数の曲線は、サンプル面積の比率が 1 ($8/8$) に近ければ緩やかであるが、サンプル面積の比率が小さい場合に急である。サンプル面積の比率に対するこの曲線の緩急は、比較間の希薄化曲線の勾配に依存しているものと考えられる。すなわち、共有科数および固



図—3.5 尾道糸崎港海老地区の2つのデータセットにおける底生生物の動物門別の科数のサンプリング面積に対する希薄化曲線とデータセット間で共通する科数および各データセットに固有の科数の解析結果。(a), (c), (e), (g)と(b), (d), (f), (h)は、それぞれ、環形動物門、軟体動物門、節足動物門、その他の動物門の希薄化曲線と共通する科数および固有の科数の解析結果を示している。エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している。

有科数のサンプリング面積に対する感度は、両方の希薄化曲線が緩やかな辺りのサンプリング面積で比較すれば鈍いものの、一方の希薄化曲線が急な辺りで比較すれば高くなるものと考えられる。

(3) 動物門別の解析結果と考察

動物門別に解析したすべての希薄化曲線の形状は、データセット間で類似している(図-3.5a, c, e および g)。環形動物門、軟体動物門およびその他の動物門の科数は、D2の方が大きい(図-3.5a, c および g)。一方、節足動物門の希薄化曲線は、D1とD2の間で交わっていることから、科数の大小の比較をする場合にはサンプリング面積を加えた考察が必要であるものの、その差はほとんど見られないと言える(図-3.5e)。また、曲線の形状がデータセット間で極端に異なることはない。

固有の科数は、環形動物門、軟体動物門、その他の動物門において、D1の方がD2よりも明らかに少ない(図-3.5b, d および h)。これらの動物門におけるD1の固有の科数は、サンプリング面積が大きくなれば、D1とD2の間の共通する科数に比べてもわずかである。このことより、これらの動物門における科の組成は、D2がD1を内包している構造であると理解できる(図-3.6a)。一方、節足動物門の固有の科数は、D1とD2でほぼ同じであり、かつ、共通科数よりも多い(図-3.5f)。このことから、両者の間の科の組成は異なっていることが理解できる(図-3.6b)。

データセット間の共通科数は、すべての動物門を対象とした場合および各動物門別を対象とした場合のいずれにおいても、サンプリング面積に対して増加傾向にあるが、すべての科を対象とした解析結果の考察のとおり、これは、比較対象の群集規模が大きくなることで、一方の固有科として評価されていたものが、共通科として評価されるようになったためである。

一方、各データセットの固有科数の変化は、動物門の間で異なっている。例えば、環形動物門におけるD1およびD2の固有科数とその他の動物門におけるD1の固有科数は、サンプリング面積が大きくなるに従って少なくなっている。これは、サンプリング面積が大きくなるに従って、新たな固有科が見つかる数よりも、固有科であったものがデータセット間の共通科として抽出される数の方が勝っているためである。サンプリング面積が十分に大きくなれば、いずれの動物門においてもこの傾向を示すものと考えられる。

3.4 まとめ

本章では、希薄化曲線を併用した群集間の共通する分類群数および各群集の固有の分類群数を評価する手法を開発し、実海域で得られた群集データに適用することで、以下の知見を得た。

群集の補完性の評価において、希薄化曲線は、同じもしくは同等のサンプリング面積において群集間の比較可能性を確認するために必要であることを示した。

群集間に共通する分類および各群集の固有の分類の抽出結果は、サンプリング面積の変化に対して変化する可能性があることを示した。可能であれば、サンプリング面積の変化に対する抽出結果の感度を解析することにより、その妥当性を確認することが望ましい。感度解析ができない場合は、希薄化曲線の形状から確認することも有効であると考えられる。

動物門別に群集の補完性の評価を行うことで、全体の群集の補完性の構造を詳細に把握できることを示した。このような解析手法は、特定の動物門もしくは分類群の保全・強化に着目した浅場修復等を行う場合に有効であると考えられる。

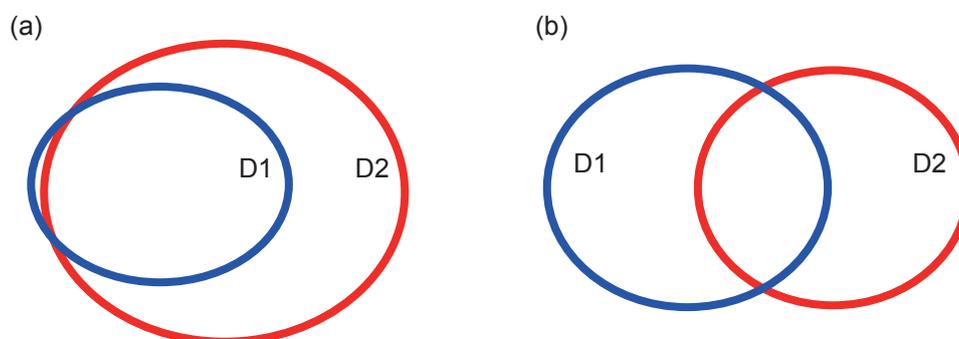


図-3.6 尾道糸崎港海老地区の2つのデータセットにおける底生生物の動物門別の群集構造の解析結果のまとめ。(a) 環形動物門、軟体動物門、その他の動物門と(b) 節足動物門の群集の補完性の解析結果から評価している。

表—4.1 尾道糸崎港の松永港区における底生生物調査の方法と群集の補完性の解析のためのデータ抽出数。潮下帯の夏(覆砂)のデータセットは、群集の補完性の解析に用いていない。サンプリング方法は1データ当たりのサンプルの採取方法を意味している。

データセット名	データ名	調査年月	サンプリング方法(縦×横×深さ×回数)	ふるい目	データ数	抽出数
潮下帯, 夏	09 Aug	2009年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	6	3
	10 Aug	2010年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	6	3
	11 Aug	2011年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	6	3
	12 Aug	2012年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	6	3
潮下帯, 夏 (覆砂)	09 Aug	2009年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	1	—
	10 Aug	2010年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	1	—
	11 Aug	2011年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	1	—
	12 Aug	2012年8月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	1	—
潮下帯, 冬	09 Feb	2009年2月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	6	3
	10 Takao	2010年1月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	7	3
潮下帯, 春 潮間帯	11 Takao	2011年5月	スミス・マッキンタイヤ型採泥器 (0.225 m×0.225 m×0.10 m×3)	1 mm	7	3
	Tidal	2010年1月	コドラート (0.250 m×0.250 m×0.20 m×1)	1 mm	9	7

4. 尾道糸崎港松永港区における潮間帯の評価

4.1 はじめに

(1) 松永港区における潮間帯と底生生物調査

港湾は主として潮下帯で構成されるが、港内においては潮間帯も分布し、複数の場所が存在する。広島県にある尾道糸崎港の松永港区(図—4.1)では、航路・泊地の整備のために浚渫が行われ、その浚渫土砂を活用した干潟造成が行われることがあり、港湾の中に潮下帯と潮間帯が複合している。

松永港区では、浚渫工事や干潟造成に関連した底生生物調査が潮下帯と潮間帯において行われている。潮下帯では、浚渫工事時の浮泥・粘土塊の周辺への拡がりを抑えることを目的とした覆砂の効果把握の基礎資料の収集を目的とした調査(17)~(21)として、2つの測線を設けた底生生物の採取が行われている。潮間帯においては、浚渫土砂の活用

による干潟造成を目的とした現況調査(22)として、松永港区の南に位置する高尾地区の潮下帯と潮間帯に測点が配置され、底生生物の採取が行われている。

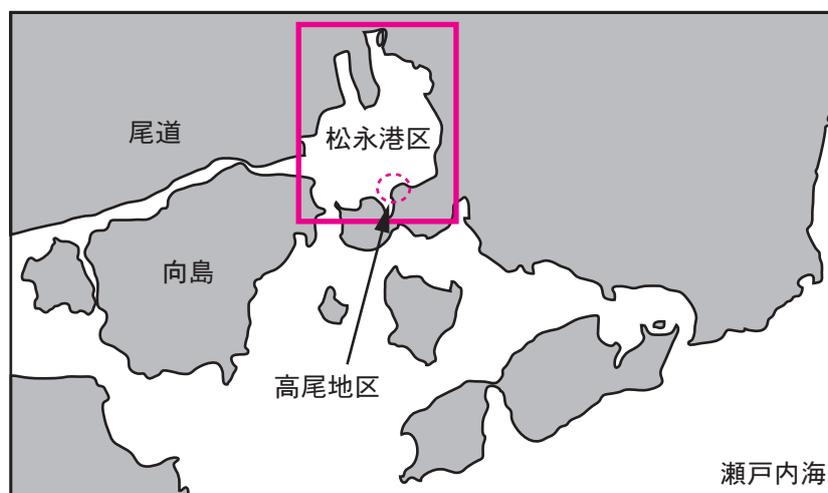
(2) 過去のデータを活用した潮間帯の評価

ここでは、松永港区における潮下帯と潮間帯について、過去に行われた調査結果を活用して、それぞれの場所の種の豊富さの比較および群集の補完性の評価を行う。この結果より、生物多様性の観点から、主として潮下帯によって構成される港湾において、潮間帯の保全もしくは造成の役割を評価する。

4.2 材料と解析方法

(1) 解析対象のデータの特徴

解析では、データベース(11)に収録された松永港区の潮下帯および潮間帯における底生生物群集および環境データを活用した。潮下帯の調査は、夏、冬、春に行われ、夏



図—4.1 尾道糸崎港における松永港区。

に関しては、覆砂が実施された場所においても行われている(表-4.1)。潮下帯の調査は、航路・泊地周辺に加え、高尾地区においても実施されている。

生物試料は、採泥器もしくはコドラートによって採取された底泥を1 mm 目のふるいにかけて、ふるい上に残ったものが群集データとして記録されている¹⁷⁾⁻²²⁾。サンプリング方法は、潮下帯と潮間帯で異なる(表-4.1)。解析対象の群集データは、種のレベルまで同定されているが、本研究では、前章と同様、科を解析対象とした。

(2) 希薄化曲線の比較

本章では、港湾における潮下帯と潮間帯の種の豊富さの比較を目的の一つとしている。ここでは、潮下帯の夏(データ総数, 24)、潮下帯の冬(同, 13)、潮間帯(同, 9)の3つの群集を比較対象とし、希薄化曲線を描き、科数を比較した。希薄化曲線は、サンプリング面積を1からデータ総数まで変動させ、各サンプリング面積につき1,000回のモンテカルロシミュレーションにより求めた科数の平均、最大値と最小値から作成した。

(3) 群集の比較

a) サンプリング面積の違いを考慮しない群集の比較

群集構造を理解するために、類似度を用いた群集解析もよく行われる。本論文では群集の補完性に着目しているものの、ここでは、群集の補完性の解析の補助的な解析として、類似度を用いた群集解析も行う。

類似度の中には、例えば、群集が類似したデータ間で大きな値を示す Jaccard 指数があるが(2.1)、本研究で対象とする潮下帯と潮間帯のデータ間では、サンプリング面積が異なることから(表-4.1)、これらの生のデータに基づいて群集の比較をしてもサンプリング面積の違いを含んだ比較をしてしまう。これに対して、種の出現確率を考慮して、Jaccard 指数に補正を加えた Chao 指数がある²³⁾。Chao 指数は、一方の群集で少ない個体数として観測され、もう一方で観測されなかった種について、観測されなかった方でも観測される可能性があるとして、観測種数に確率的な補正が加えられる。ここでは、少しでもサンプリング面積の差に起因した希少な種の数の差を調整することを目的として、Chao 指数を用いた群集構造の比較を行った。

類似度に基づいて複数の群集間を比較する場合、各データ間の類似度を行列にした類似度行列が解析に用いられる。この類似度行列は多次元空間であるため、これを用いて複数の群集間の群集構造を視覚的に理解することは容易ではない。そこで、この類似度行列を低次元化して、群集間の構造を視覚化する手法が応用される。なお、群集が似ていないデータ間が遠いほど直感的な理解が容易であるため、実際には、類似度行列は、解析の過程で非類似度行列に変換され、非類似度行列が視覚化される^{7),24)-26)}。

本研究では、非類似度行列を視覚化する手法として、非類似度を順序付けしたものを視覚化する非計量多次元尺度法(Nonmetric multidimensional scaling: nMDS)を用いた。非類似度を直接視覚化してしまうと、極端に他と異なる非類似度があるデータが強調されて全体の関係が見えにくくなってしまうことがあるのに対し、nMDSを用いることで、その極端さを抑えた頑健な解析が可能となる²⁴⁾⁻²⁶⁾。ここでは、群集構造の関係を2次元へ低次元化し、その適合度については、STRESS²⁴⁾と呼ばれる指標を用いて評価した。

次に、群集の環境応答を比較するため、非類似度を対象とした距離に基づく冗長性解析(Distance-based Redundancy Analysis: db-RDA)²⁶⁾を行った。説明変数として、調査年、季節(夏, 冬, 春)、高尾地区、潮間帯、覆砂場所を考慮した。調査年、季節(夏, 冬, 春)、高尾地区、潮間帯、覆砂場所、がデータ間の非類似度に差を生じさせたかどうかについて、これらを説明変数として、Permutational Multivariate Analysis of Variance(PERMANOVA)²⁷⁾を行い、その差の有意性を検定した。

これらの群集解析は、R言語におけるveganパッケージ²⁸⁾を用いて実施した。nMDSとdb-RDAの解析は、それぞれ、metaMDS関数とcapscale関数を用いて実施した。PERMANOVAはadonis関数を用い、並べ替え回数を10,000回として実施した。

b) 群集の補完性の解析

共通する科数および固有の科数の解析は、潮下帯の夏(データ総数, 24)、潮下帯の冬(同, 13)、潮間帯(同, 9)の3つの群集を比較して行った。

潮下帯と潮間帯の1回当たりのサンプリング面積が、それぞれ、 $0.225 \text{ m} \times 0.225 \text{ m} \times 3$ および $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 1$ であることから、潮下帯から3つのデータ、潮間帯から7つのデータを抽出し、それぞれの総面積を 0.4556 m^2 と 0.4375 m^2 として、3つの群集において擬似サンプルデータを作成し(第3章)、解析を実施した。この数の組み合わせで1,000回のモンテカルロシミュレーションを実施し、共通科数および固有科数の平均、最大値、最小値を求めた。なお、共通する科数および固有の科数の解析は、3つの群集間のものであることから、2つの群集間の関係も見られるようにするため、上記のモンテカルロシミュレーション毎に2つの擬似サンプルデータ間で Jaccard 指数(式(3))を計算し、その平均および95%区間を求めた。

解析は、すべての動物門に含まれる科を対象とした場合、環形動物門、軟体動物門、節足動物門、その他の動物門に含まれる科のみを対象とした場合について実施した。解析プログラムは、R言語¹⁶⁾を用いて記述した。なお、生物の分類は、WoRMS¹⁷⁾の方法に統一した。

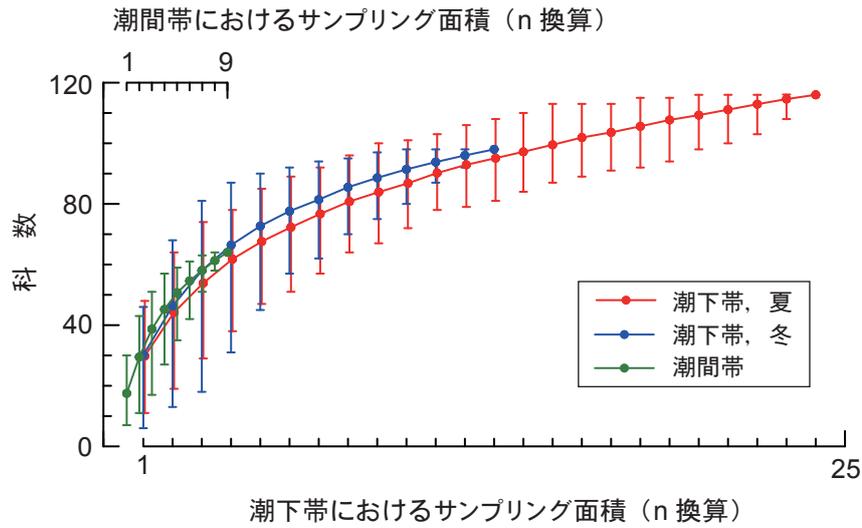
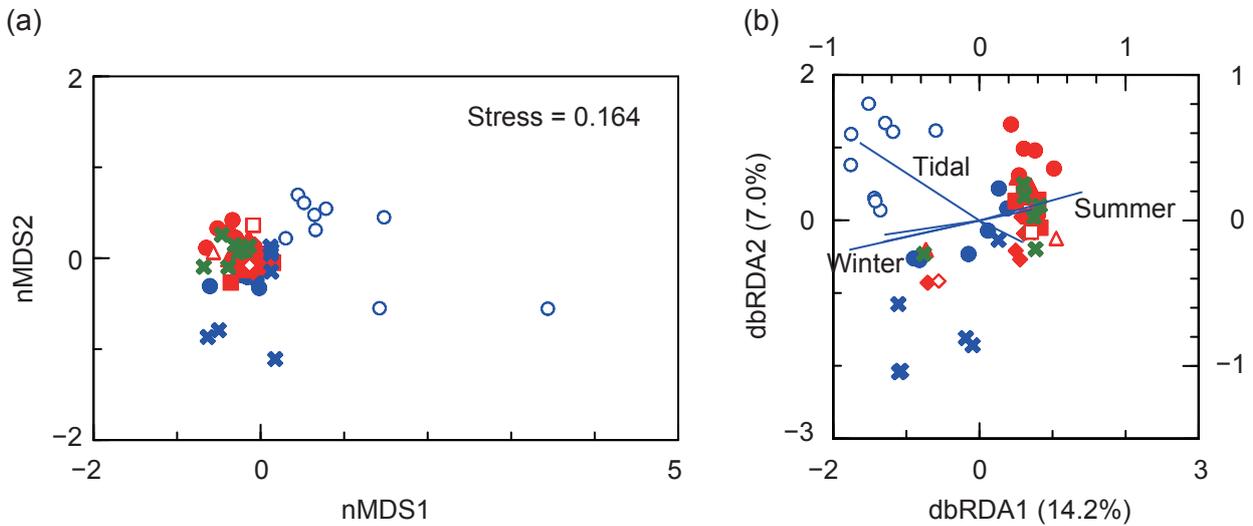


図-4.2 尾道糸崎港松永港区の潮下帯の夏と冬および潮間帯における底生生物の科数のサンプリング面積に対する希薄化曲線。潮下帯と潮間帯の横軸については、サンプリング面積が同じになるよう配置している。エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している。



凡例		夏	冬	春
		覆砂		
潮下帯	09	●	●	
	10	▲	△	
	11	◆	◇	
	12	■	□	
潮間帯	高尾地区		×	×
			○	

図-4.3 尾道糸崎港松永港区における潮下帯および潮間帯の群集構造の比較。各データ間のサンプリング面積の違いについては考慮していないが、類似度としてChao指数を用いて、群集構造を比較している。(a) 非計量多次元尺度法(nMDS)による2次元化した群集構造の比較と(b) 距離に基づく冗長性解析(db-RDA)において説明変数として調査年、季節(夏、冬、春)、高尾地区かどうか、潮間帯かどうか、覆砂場所かどうかを考慮した群集構造の比較の結果。

表—4.2 尾道糸崎港松永港区における潮下帯および潮間帯の群集構造の比較. 群集構造は, サンプル面積を同等にした擬似サンプルデータに基づいた Jaccard 指数を比較している.

比較対象	平均 (95% 区間)
潮下帯, 夏 vs 潮下帯, 冬	0.43 (0.31—0.53)
潮下帯, 夏 vs 潮間帯	0.19 (0.15—0.24)
潮下帯, 冬 vs 潮間帯	0.22 (0.15—0.28)

4.3 結果と考察

(1) 希薄化曲線の比較

潮下帯の夏, 潮下帯の冬, 潮間帯のすべてが同様の希薄化曲線を示し (図—4.2), 場所間および季節間に明確な差は見られなかった. このことは, それぞれの場所の種の豊富さ (α 多様性) だけを生物多様性の指標とした場合, 場所間もしくは季節間での優劣が見られないことを意味している.

なお, いずれの希薄化曲線も極端に他と異なることがないことから, ここでは, 群集間の比較が同等のサンプル面積の下で可能であると判断する. ただし, 群集を比較するサンプル面積 (潮下帯の n は 3, 潮間帯の n は 7) の近傍では, 希薄化曲線の勾配は急であることから, 共通科および固有科の抽出結果の解釈については, 十分な考察が必要である.

(2) サンプル面積の違いを考慮しない群集の比較

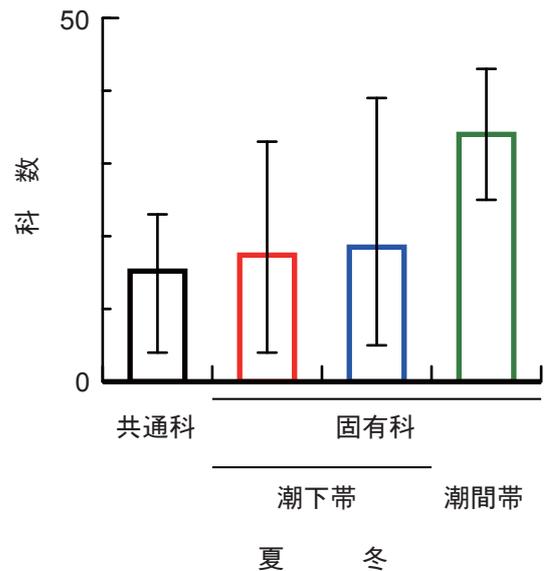
サンプル面積の違いを考慮しない群集構造の比較では, 潮間帯と潮下帯の間で非類似度に視覚的な差が見られ (図—4.3a), この差は有意であった ($F=6.62, p<0.001$). db-RDA では, 第一軸および第二軸が, それぞれ, 10% 程度の分散しか有していないものの, 潮間帯が群集構造の違いの要因になっているように見える (図—4.3b).

季節間の非類似度の差は有意であるものの ($F=4.38, p<0.001$), nMDS ではその差は見えにくい (図—4.3a). db-RDA では, 潮下帯の中でも夏と冬の季節差によって群集構造に差があるように見える (図—4.3b).

調査年間の非類似度の差も有意であるものの ($F=3.19, p<0.001$), その影響は, nMDA と db-RDA の両方の解析結果から, あまり大きなものとは判断しにくい (図—4.3a および b). 高尾地区であることと, 覆砂場所であることは, 非類似度に有意な差を生じさせていなかった.

nMDS における STRESS は 0.164 であり, 「解釈に注意が必要」²⁴⁾ な程度である. 本解析では, 3つの変数による群集構造の差が見られ, この結果として, データ間の群集構造の違いが多次的になり, 低次元へ図化しにくくなったものと考えられる.

ここまでの群集構造の比較により, 潮間帯と潮下帯の違



図—4.4 尾道糸崎港松永港区における場所に共通する科数と各場所に固有の科数の解析結果. エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している.

い, 季節, 調査年が群集構造に差を生じさせていることが示唆された. しかし, これらは, 群集構造の差を示したのみであり, 群集の補完性の有無は示していない.

(3) 同等のサンプル面積の下における群集の比較

a) すべての科を対象とした解析結果

サンプル面積を同等にした擬似サンプルデータ間の Jaccard 指数より, 潮下帯の季節間の群集構造の類似度に比べて, 潮下帯に対する潮間帯の類似度は小さい. 類似度の 95% 区間を見てもお互いに重なり合っていないことから, その差は明らかである (表—4.2).

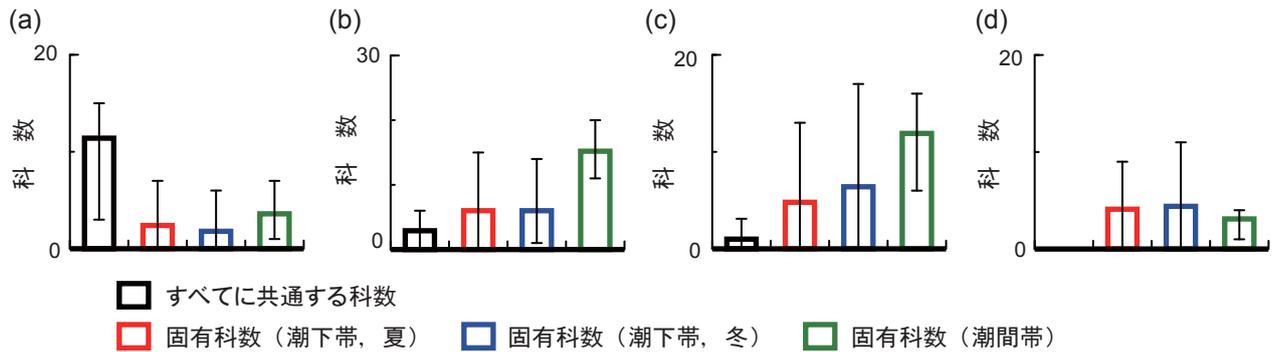
潮下帯と潮間帯では, 固有の科が出現しており, それぞれの群集が補い合っている関係にあると評価できる (図—4.4). このサンプル面積の下での比較においては, 潮間帯の固有科数が, 潮下帯におけるそれぞれの季節の固有科数よりも 2 倍程度多い. 固有科数の大きさの評価は, サンプル面積の大きさの影響も受けるが (3.3), 潮間帯の固有科数の分布 (最小値から最大値まで) は, 潮下帯の分布よりも大きく, 潮間帯の固有の科は, 潮下帯に対して多いと判断できるものと考えられる. 潮間帯の調査は, 礫質や岩盤で行われており²²⁾, 多様な基質が固有の科の多さの原因となっている可能性がある. nMDS による群集構造の比較においても, 潮間帯の中の地点間でのばらつきが大きく (図—4.3a), この結果からも, 潮間帯内の群集が多様であることが推測される.

b) 動物門別の解析結果

サンプル面積を同等にした擬似サンプルデータ間の

表—4.3 尾道糸崎港松永港区における潮下帯および潮間帯の動物門別の群集構造の比較。群集構造は、サンプリング面積を同等にした擬似サンプルデータに基づいた Jaccard 指数を比較している。

比較対象	平均 (95% 区間)			
	環形動物門	軟体動物門	節足動物門	その他の動物門
潮下帯, 夏 vs 潮下帯, 冬	0.65 (0.48—0.81)	0.36 (0.17—0.54)	0.34 (0.19—0.48)	0.29 (0.09—0.50)
潮下帯, 夏 vs 潮間帯	0.51 (0.41—0.63)	0.12 (0.04—0.21)	0.06 (0.00—0.12)	0.00 (0.00—0.00)
潮下帯, 冬 vs 潮間帯	0.58 (0.41—0.71)	0.14 (0.03—0.23)	0.10 (0.00—0.15)	0.01 (0.00—0.09)



図—4.5 尾道糸崎港松永港区における動物門別の場所に共通する科数と各場所に固有の科数の解析結果。(a) 環形動物門、(b) 軟体動物門、(c) 節足動物門、(d) その他の動物門の解析結果。エラーバーは最小値から最大値までの幅を示している。

Jaccard 指数は、動物門別に異なる傾向を示している (表—4.3)。環形動物門の Jaccard 指数は、潮下帯の季節間および潮下帯と潮間帯の間での群集構造に大きな差はない。軟体動物門においては、潮下帯と潮間帯の間の類似度が潮下帯の季節間のものより小さいものの 95% 区間は重なっており、明らかに異なる群集とは言えない。節足動物門とその他の動物門における類似度は、潮下帯と潮間帯の間のものが潮下帯の季節間のものより明らかに小さい。

群集間の共通科数と各群集の固有科数を見ても、そのバランスが動物門ごとに異なる (図—4.5)。環形動物門においては、それぞれの固有科数は、群集間の共通科数に対して少ない (図—4.5a)。類似度の比較においても、3つの群集の間で差が見られなかったことから、環形動物門の科は潮下帯と潮間帯に関係なく分布していると言える。比較するサンプリング面積が大きくなれば、共通科数は大きくなることから (3.3)、この評価は、確からしいものと考えられる。軟体動物門と節足動物門においては、逆に、共通科数が少ない (図—4.5b および c)。その他の動物門においては、共通科数は見られず、潮下帯と潮間帯で異なる群集が分布している (図—4.5d)。Jaccard 指数に差があることとこれらの結果は、これら動物門の科は、潮下帯と潮間帯で異なる分布を有していることを意味している。特に、軟体動物門と節足動物門の固有の科は潮間帯に多く、軟体動物門では、

多板綱 (ヒザラガイ類) の 4 科が潮間帯のみに出現していることが特徴である。節足動物においては、昆虫の 3 科が潮間帯のみに出現し、潮間帯の固有科が他より多くなる要因となっているものと考えられる。すなわち、軟体動物門、節足動物門、その他の動物門に関しては、潮下帯と潮間帯の群集が、それぞれ補い合っている関係にあると言える。

4.4 まとめ

本章では、尾道糸崎港松永港区における既存の底生生物群集データに対して、種の豊富さ (α 多様性) の比較と群集の補完性 (β 多様性) の評価を行った。

この結果、科数の比較だけで見ると、潮下帯と潮間帯の間、もしくは潮下帯の季節間に差はなく、それぞれの場所の種の豊富さの観点だけでは、いずれにも優劣が見られなかった。しかし、群集の補完性の観点から見れば、潮下帯と潮間帯の群集は補い合っている関係であることが明らかとなった。この潮下帯と潮間帯の群集の補完性は、軟体動物門、節足動物門、その他の動物門の貢献による結果であった。一方、環形動物門の多くの科は、潮下帯と潮間帯の両方に分布しており、松永港区における群集の補完性においては、環形動物の寄与は小さい。

尾道糸崎港松永港区における事例より、主として潮下帯で構成される港湾に潮間帯を保全したり、修復したりするこ

とで、港湾全体の種の豊富さを維持する、もしくは効率的に高くすることができる可能性があると考えられる。

5. おわりに

5.1 本研究のまとめ

本研究では、港湾における生物多様性に関して、種の豊富さの維持もしくは向上の判断に重要となる群集の補完性に着目し、それを評価するための解析手法を開発し、既存のデータを活用して実海域へ適用した。

群集の補完性の評価においては、本研究で開発した手法を用いることで、異なるサンプリング手法で得られたデータセットであっても、サンプリング面積を同じもしくは同等に調整した擬似サンプルデータを作成することで、群集の補完性の評価ができるようになった。今後、本手法を用いて既存のデータを再解析したり、同じ手法でサンプリングできない調査において本手法を適用したりすることで、港湾における浅場による種の多様性への寄与に関する知見が充実していくことが期待される。

5.2 港湾における生物多様性の研究の今後の課題

(1) さらなる知見の獲得

a) 既存のデータを活用した知見の獲得

港湾事業等においては、事業の生物への影響評価のために異なる手法で生物調査が行われていることも多いが、本研究で開発した手法を用いることで、過去のデータを活用した再評価が可能となる。例えば、瀬戸内海における底生生物の調査結果はデータベースとしてとりまとめられており¹¹⁾、これらを活用することで、港湾における生物多様性に関するさらなる知見の獲得が期待される。

b) 基質の違いに着目した知見の獲得

潮間帯だけでなく、藻場や人工構造物等も含めた基質の違いによる群集の補完性を評価できれば、種の豊富さの強化を目指した浅場修復計画の立案に資する事前の知見をさらに充実させることができると考えられる。

また、潮間帯だけに着目しても、基質の違いも生物多様性に重要な役割を担っているものと考えられることから、基質別に群集の補完性を評価すれば、より効率的に港湾における種の豊富さを強化できる可能性がある。

これらを明らかにするためには、既存のデータの活用だけでなく新たな調査が必要となる。新たな調査を実施する場合においては、群集の補完性の評価に適した方法の検討も重要である（付録 E）。

(2) 場所の規模を含む種の豊富さの評価

領域当たりの種密度（場所の規模を含む種の豊富さの評価）について、本研究では保全の必要性の指標として不向

きと考えられたことから、研究対象から外した(2.3)。しかし、浚渫土砂の有効利用が領域全体にどのような影響を与えるのかを評価する場合のように、この指標の活用方法を検討することも重要である。

(2016年9月26日受付)

謝辞：本研究は、平成27年度における国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所からの受託研究の一部として実施した。関係者には多大なる支援を頂いた。本研究のアイデアは、オーストラリア連邦科学産業研究機構の Batley GE 氏および Chariton AA 氏との議論を参考にして生まれた。また、本研究をまとめるにあたって、井上徹教海洋環境情報研究グループ長、中泉昌光特別研究主幹、片山昭特別研究主幹、港湾空港技術研究所および北海道大学厚岸臨海実験所の諸氏から有益なコメントを頂いた。みなさまに対して、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 宮下直, 井鷲裕司, 千葉聡: 生物多様性と生態学—遺伝子・種・生態系—, 朝倉書店, 2012.
- 2) 環境省: 生物多様性国家戦略 2012-2020—豊かな自然共生社会の実現に向けたロードマップ—, 平成24年9月. URL <http://www.env.go.jp/press/files/jp/20763.pdf>
- 3) 国土交通省港湾局海洋・環境課: 港湾環境政策の説明資料, 平成27年9月. URL <http://www.mlit.go.jp/common/001103000.pdf>
- 4) 国土交通省中国地方整備局, 水産庁漁港漁場整備部: 瀬戸内海環境修復計画の概要—自然と共生する恵み豊かな瀬戸内海の修復を目指して—. URL <http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/setsu/img/setonaikai-summary.pdf>
- 5) 国土交通省中国地方整備局港湾空港部: 「瀬戸内海環境修復計画」について, 平成17年2月. URL http://www.cgr.mlit.go.jp/kisha/2005feb/050204top2_01.htm
- 6) Mackenzie A, Ball AS, Virdee SR: 生態学キーノート (訳, 岩城英夫), Springer, 1998.
- 7) Anderson MJ, Crist TO, Chase JM, Vellend M, Inouye BD, Freestone AL, Sanders NJ, Cornell HV, Comita LS, Davies KF, Harrison SP, Kraft NJB, Stegen JC, Swenson NG: Navigating the multiple meanings of β diversity: A roadmap for the practicing ecologist. *Ecol Lett* 14: 19–28, 2011.
- 8) 独立行政法人国立環境研究所: 生物多様性の減少機構の解明と保全プロジェクト (最終報告), 国立環境研究所特別報告, SR-72-2006, 2006.
- 9) Colwell RK, Coddington JA: Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B: Biological sciences* 345: 101–118, 1994.
- 10) Gotelli NJ, Colwell RK: Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecol Lett* 4: 379–391, 2001.

- 11) 一般財団法人みなと総合研究財団：人工干潟における底生生物生息状況の効果活用検討業務報告書，平成26年11月。
- 12) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港工事事務所，国土環境株式会社：平成13年度尾道糸崎港干潟における生物生息状況調査報告書，平成14年1月。
- 13) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，三洋テクノマリン株式会社：平成16年度尾道糸崎港干潟における生物生息状況調査報告書，平成16年11月。
- 14) Dethier MN, Schoch GC: Taxonomic sufficiency in distinguishing natural spatial patterns on an estuarine shoreline. *Mar Ecol Prog Ser* 306: 41–49, 2006.
- 15) World Register of Marine Species. URL <http://www.marinespecies.org/>.
- 16) R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. URL <http://www.R-project.org/>.
- 17) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，いであ株式会社：平成20年度尾道糸崎港機織地区環境現況調査業務報告書，平成21年3月。
- 18) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，いであ株式会社：平成21年度尾道糸崎港機織地区環境現況調査業務報告書，平成21年12月。
- 19) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，いであ株式会社：平成22年度尾道糸崎港機織地区環境現況調査業務報告書，平成22年12月。
- 20) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，いであ株式会社：平成23年度尾道糸崎港機織地区環境現況調査業務報告書，平成23年12月。
- 21) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，三洋テクノマリン株式会社：平成24年度尾道糸崎港機織地区環境現況調査業務報告書，平成24年10月。
- 22) 国土交通省中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所，復建調査設計株式会社：平成21年度尾道糸崎港沿岸域現況調査及び検討業務報告書，平成22年3月。
- 23) Chao A, Chazdon RL, Shen TJ: A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. *Ecol Lett* 8: 148–159, 2005.
- 24) Zuur AF, Ieno EN, Smith GM: *Analysing Ecological Data*. Springer, 2007.
- 25) 土居秀幸，岡村寛：生物群集解析のための類似度とその応用：Rを使った類似度の算出，グラフ化，検定，*日本生態学会誌*，Vol.61，pp.3–20，2011。
- 26) Legendre P, Legendre L: *Numerical Ecology, Developments in Environmental Modelling* 24. Elsevier, 2012.
- 27) Anderson MJ: A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26: 32–46, 2001.
- 28) Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Wagner H: *Community Ecology Package 2.3-5*, 2016. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>

付録 A 生物多様性国家戦略と港湾環境政策

(1) 生物多様性国家戦略

生物多様性条約第10回締約国会議では、2011年以降の生物多様性に関する世界目標である愛知目標が採択され、2050年までの長期目標と2020年までの短期目標が設定された。短期目標では、「生物多様性の損失を止めるために効果的かつ緊急な行動を実施する」ことが掲げられ、これを達成するため、5つの戦略目標と計20の個別目標が設定された。

生物多様性国家戦略は、生物の多様性に関する条約の発効後に我が国で策定されているものである。現在は、5番目の国家戦略（生物多様性基本法に基づく国家戦略としては2番目）である「生物多様性国家戦略2012-2020」が策定されており、この中では、2020年度までの間に重点的に取り組むべき国の施策の大きな方向性として、5つの基本戦略が掲げられている¹⁾。

基本戦略のうちの4つは過去の国家戦略からの引き続きであるが、残り一つの「科学基盤を強化し、政策に結びつけること」は現国家戦略から新たな基本戦略として加えられている。これは、「生物多様性の保全のためには、現状を把握し、損失・劣化が進んでいる場合にはそのような状況をできるだけ早い段階でとらえ、原因を特定するとともに、適切な対策を講じていくことが重要」であることを背景としている。

また、「生物多様性国家戦略2012-2020」の中では、愛知目標の戦略目標に対する我が国の主要行動目標が具体化されている。例えば、「生物多様性への直接的な圧力の減少と持続可能な利用の促進」を目指す戦略目標に対し、「2020年までに自然生息地の損失速度が少なくとも半減、また、可能な場合にはゼロに近づき、また、自然生息地の劣化・分断を顕著に減少させるため、生態系ネットワークの形成や湿地、干潟の再生等必要な取組を行う」ことが主要目標として掲げられている。

(2) 港湾環境政策

国土交通省港湾局海洋・環境課は、2015年9月に港湾環境政策の目指す方向として、豊かな海域環境の次世代への継承、地球規模の環境問題の解決に向けた取り組みの強化、地方創生への貢献を示した²⁾。

豊かな海域環境の次世代への継承の中では、生物多様

性や沿岸域生態系の観点も含めた海域環境の状態を包括的に評価する手法の確立は発展途上であること、と指摘し、生物多様性について直接触れている。

地方創生への貢献においては、施策の具体例の一つとして、「生態系サービスの強化に向けた、海域環境の保全・再生・創出に資する取組みの継続的な推進」が挙げられている。この中では、生物多様性に関する直接的な言及はないものの、生物多様性の維持・回復は、生態系サービスの確保につながることから¹⁾、生物多様性の維持・回復もその意味の中に含まれているものと理解できる。また、生物多様性の積極的な強化も、同様に重要な施策となる可能性が考えられる。

国土交通省としては、これまでも、干潟の造成技術の事例をとりまとめたり³⁾、干潟造成技術に関連したアサリ等の増加を目的とした地盤環境に関する研究に取り組んだりする等⁴⁾により、生物多様性の維持・回復に貢献しており、今後の継続的な貢献も期待される。また、干潟造成は、干潟の生物多様性の維持・回復するだけでなく、干潟周辺にアマモ場が形成される等⁵⁾、藻場再生の観点からの生物多様性の維持・回復に寄与する可能性がある。

参考文献

- 1) 環境省：生物多様性国家戦略2012-2020—豊かな自然共生社会の実現に向けたロードマップ—、平成24年9月。URL <http://www.env.go.jp/press/files/jp/20763.pdf>
- 2) 国土交通省港湾局海洋・環境課：港湾環境政策の説明資料、平成27年9月。URL <http://www.mlit.go.jp/common/001103000.pdf>
- 3) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所：干潟造成技術マニュアル（Ver.1）—成功事例に学ぶ干潟造成技術—、平成18年3月。URL https://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/tecinfo/img/m_higata.pdf
- 4) 佐々真志，渡部要一，梁順普：多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.1226-1230，2009。
- 5) 春日井康夫，久本忠則，中山康二，松本英雄：広島県尾道糸崎港における干潟再生事業，海洋開発論文集，Vol.19，pp.107-112，2003。

付録 B 生物多様性へ寄与する港湾事業の課題

ここでは、生物多様性へ寄与するための港湾事業における具体的な課題として、浅場修復を例とした4つの課題を考えた(図-B.1)。

(1) 浅場修復計画の立案に資する事前の知見

港湾の中で新たな群集を創出できる浅場が分かっている場合、効率的に生物多様性を強化する浅場修復を立案することが可能となる。このため、場と群集に関する事前の知見が必要となる。

(2) 浅場修復の事前と事後の変化の予測および評価

立案した浅場修復計画の具体的な効果を検討するためには、浅場修復の事前と事後における生物多様性の変化を予測し評価する必要がある。この予測・評価ができることで、生物多様性を強化できる浅場修復案の選定を効率的に実施することが可能となる。

(3) 浅場修復の事前と事後のモニタリングおよび評価

浅場修復の事前と事後にモニタリングを行うことで、浅場修復の効果を評価できるようになる。

(4) 浚渫土砂を有効利用する場合の影響評価

浅場修復は、航路や泊地の維持・整備のための浚渫によって得られた土砂を有効利用して行われることがある。し

かし、浚渫土砂の有効利用においては、環境への配慮およびその効果と影響の評価が求められている¹⁾。しかし、その効果と影響について、何を対象するべきか、については明確にされていない。

浚渫土砂の有効利用による影響について、これまで、底質に対する底生生物の応答に関する研究^{2),3)}が進められてきたが、これらの研究成果に加え、生物多様性を一つの軸とした評価ができるようになれば、浚渫土砂の有効利用による影響を判断する対象がより明確になる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：浚渫土砂の海洋投入及び有効利用に関する技術指針，平成18年6月。URL <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/11/110619/01.pdf>
- 2) 内藤了二，中村由行，浦瀬太郎：港湾域の底泥中化学物質濃度と底生生物叢の関係，港湾空港技術研究所資料，No.1174，2008。
- 3) 細川真也：地方と地域によるばらつきを考慮した港湾域における底生動物種数と関係する底質の推定，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.1，pp.65-78，2014。

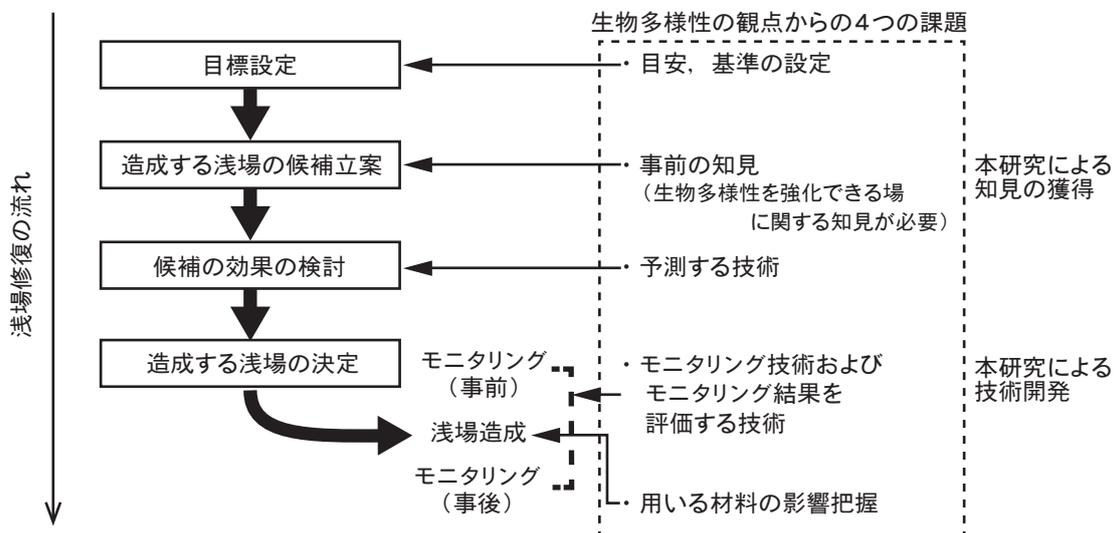


図-B.1 浅場修復の目標設定から実施までの流れと必要になると考えられる生物多様性に関する知見と技術。

付録 C 観測種数の比較における誤り

(1) サンプルングエフォートが比較可能でない場合

観測種数の比較における最も単純な誤りとして、2つの比較対象間でサンプルングエフォートが比較可能でないことによってはまるものがある。例えば、真の種数が多くても、そのサンプルングエフォートが小さいことにより、もう一方よりも観測種数が少なくなる場合である(図-C.1)。この誤りは、サンプルングエフォートに注意を払っていない場合にはまる¹⁾。

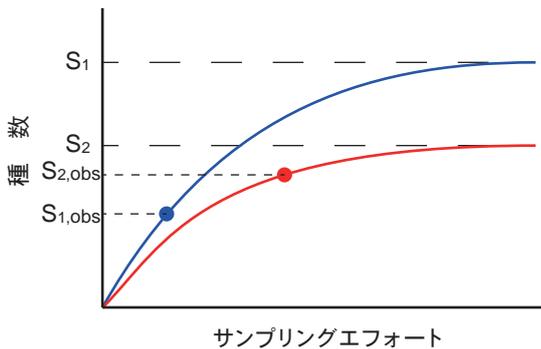


図-C.1 最も単純な観測種数の比較における誤り。たとえ、真の種数が多くても ($S_1 > S_2$)、サンプルングエフォートが少なければ観測種数は少なくなり ($S_{1,obs} > S_{2,obs}$)、誤った比較の原因となる。

この誤りは、観測種数から真の種数(例えば、Chao et al. (2014)²⁾)を推定することで回避できる。また、比較する群集間の構造が似ていれば、同じサンプルング回数(個体)で定義される期待種数³⁾を用いることで回避することも可能である。

(2) 比較対象間で群集の構造が似ていない場合

希薄化曲線の形状は、群集の構造に依存することから(2.2(1))、比較しようとしている群集間の希薄化曲線が異なる事もある(図-C.2)。希薄化曲線の形状が極端に異なっていれば、サンプルングエフォートが同じでも観測種数は比較できない。この場合、期待種数を用いても群集間の比較はできない¹⁾。

参考文献

- 1) Gotelli NJ, Colwell RK: Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecol Lett* 4: 379–391, 2001.
- 2) Chao A, Gotelli NJ, Hsieh TC, Sander EL, Ma KH, Colwell RK, Ellison AM: Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecol Monogr* 84: 45–67, 2014.
- 3) Hurlbert SH: The nonconcept of species diversity: A critique and alternative parameters. *Ecology* 52: 577–586, 1971.

(a) 希薄化曲線の形状が違えば、観測種数の場所間の大小関係は、サンプルングエフォートによって入れ替わる可能性がある。

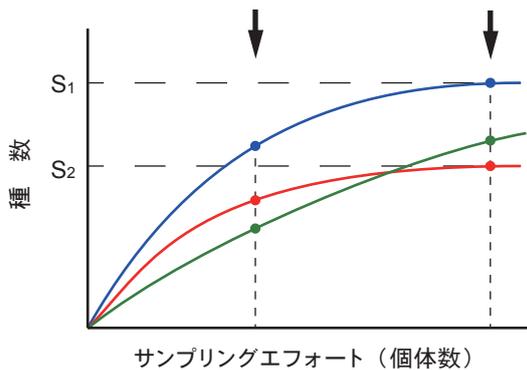
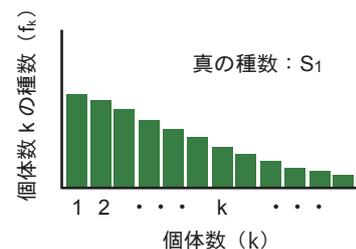
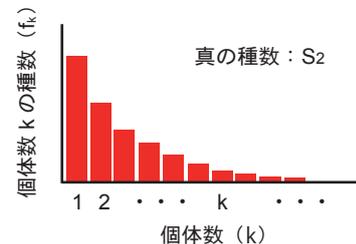
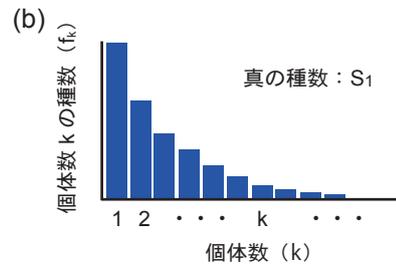


図-C.2 同じサンプルングエフォートでも観測種数を比較できない誤り。(a) サンプルングエフォートが同じ場合でも、希薄化曲線の形状が異なれば、観測種数の大小関係が入れ替わることもある。この誤りは、例えば、(b) 個体数に対する種数の分布の違いがある場合に起きるものと考えられる。サンプルングエフォートを枠取り面積とした場合、枠取りの出現頻度に対する種数の分布の違いも、この誤りの原因となる。



付録 D 希薄化曲線の種類と意味

(1) 2つの希薄化曲線

希薄化曲線には2つの種類があり、それぞれ異なるサンプリングエフォートに基づいており(2.2(2))、使用目的に応じて、適した希薄化曲線を選択する必要がある。

サンプリング面積に対する希薄化曲線は、種密度(面積当たりの種数)を評価していることになり、この曲線は場の保全を目的とした場合に用いられる¹⁾。一方、個体数に対する希薄化曲線は、生態学的なモデルの検証や予測理論の評価に適していると考えられる¹⁾。

本研究では、港湾における浅場の保全および修復を目的としていることから、サンプリング面積に対する希薄化曲線、すなわち、種密度を対象とすることが妥当であると考えられる。

(2) 2つの種密度

ここで、いくつかの場所を含む領域における種密度を考えた場合、おそらく、サンプリングされた面積当たりの種密度と領域面積当たりの種密度の2つのタイプの種密度を定義することができる。これらの違いを明確にしなければ、正しく群集の補完性を評価できない。

以下では、領域に2つの場所が含まれている場合を考え、上記の2つの種密度の違いを考察し、本研究で対象とすべき種密度を明確にする。

a) サンプリングされた面積当たりの種密度

サンプリングされた面積当たりの種密度は、場所の規模に依らず、それぞれの場所の種の豊富さの質を評価するものと考えられる(図-D.1(a))。このことより、場所の保全の必要性を検討する際に有効な指標であると考えられる。港湾における群集の補完性の評価においては、希少な場を対象とすることもあることから、この種密度を用いることが適していると考えられる。

群集の補完性の評価においては、希薄化曲線を描いて、群集間で同等のサンプリング面積で比較可能かどうかの妥当性を確認する必要がある。

b) 領域面積当たりの種密度

領域面積当たりの種密度を把握するためには、領域内に満遍なく調査地点数を配置することになることから、各場所の調査地点数はその規模に比例し、それぞれの場所におけるサンプリング面積も場所の規模に依存した形で定義される(図-D.1(b))。もし、サンプリング面積を十分に大きくでき、それぞれの場所に含まれる真の種数に近いレベルまでサンプリングできれば、この種密度は、それぞれの場所の規模に依存しない種数を評価することになる。

しかし、サンプリング面積が十分に大きくできなければ、領域面積当たりの種密度はそれぞれの場所の規模の影響も

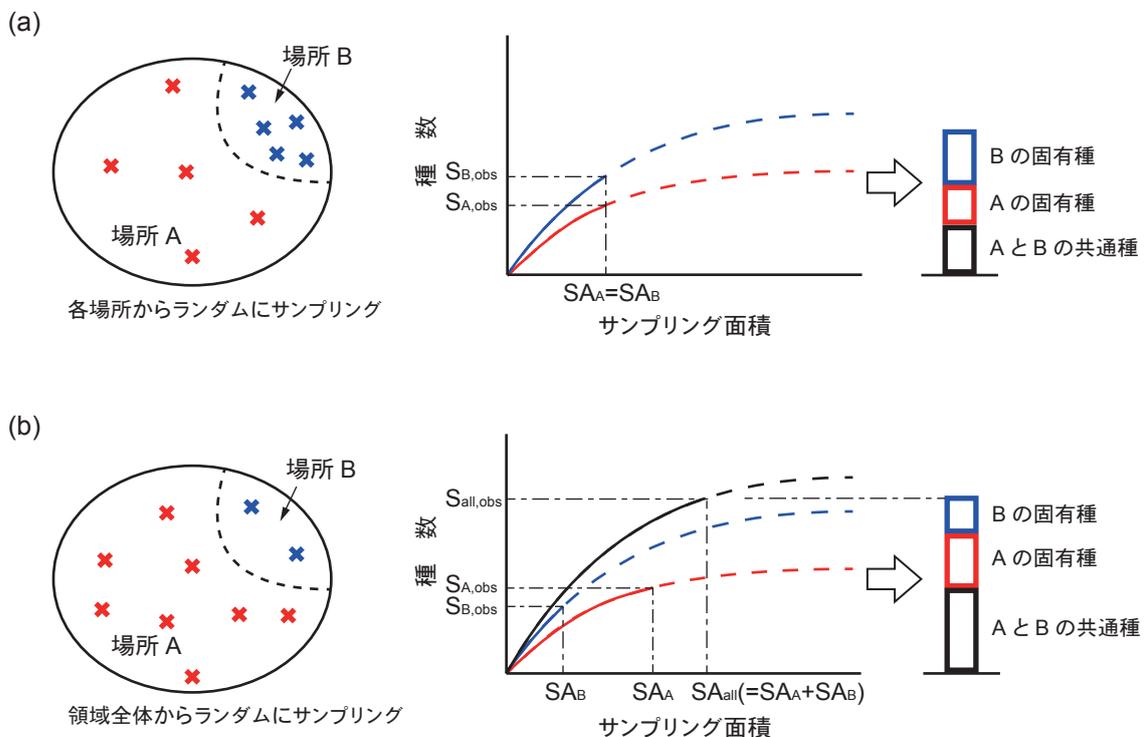


図-D.1 考えられる2つの種密度とその調査および評価方法。(a) 各場所の種密度とその比較に関心がある場合と(b) 領域全体の種密度と各場所の全体に対する貢献度に関心がある場合。ただし、いずれも場所内の群集の分布は一樣の場合。

含んだ指標になると考えられる。すなわち、群集の補完性の評価にこの種密度を用いると、規模が小さな場所ほど、その貢献度の評価は低くなる。

予算的コストの観点から、通常、サンプリング面積を十分に大きくできることは考えにくく、領域面積当たりの種密度の実質的な意味は後者になる。このため、希少な場所の保全を対象とする場合、この種密度による群集の補完性の

評価は、適していないことが理解できる。

参考文献

- 1) Gotelli NJ, Colwell RK: Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecol Lett* 4: 379–391, 2001.

付録 E 群集の補完性の評価のための調査方法

群集の補完性の評価を目的とした調査を行う場合、その目的に適した調査方法を考える必要がある。

(1) 調査方法を定める上で考慮すべきこと

生物調査においては、①可能な限り、サンプリング面積を大きくし、さらに、②多くのサンプルをランダムに得ることを考慮する必要がある。①は、真の群集構造に近い状態を観測するために望まれることである。②における「多くのサンプル」の意味については、サンプリング面積を大きくするというよりも、サンプルの数を多くするということが重要である。サンプルをランダムに多く得ることで、データの偏りを避けることができる。さらに、サンプルの数が増えることで、比較間のサンプリング面積が同じもしくは同等になる組み合わせが多くなりやすい。サンプリング面積が同じもしくは同等になる組み合わせが多くなれば、サンプリング面積に対する共通種数および固有種数の変化を高い分解能で見ることができる（第3章）。

最後に、生物調査においては、比較対象の場所ごとに異なる採泥器もしくはコドラートを使用せざるを得ない場合、③各サンプリング単位の面積の大きさとサンプリング地点の

数を工夫し、サンプリング面積を合わせやすくするようになる必要がある。

(2) 調査方法の決め方

比較対象の場所で同じサンプリング手法を採用できる場合、①と②を勘案して、サンプルの偏りを許容しつつ1回当たりのサンプリングの面積を大きくするか、サンプルの偏りを避けつつサンプリング地点数を増やすことによって、総サンプリング面積を大きくすることを検討する必要がある。しかし、サンプリング地点の増加は、分析コストの増加の原因にもなることから、サンプリング地点数の増減は、サンプルの偏りを避けることとコスト増とのトレードオフになってしまう。最適な調査方法は、予算とサンプルの偏りの観点から、1回当たりのサンプリングの面積の大きさとサンプリング地点数を検討し、決める必要がある。

場所によって異なるサンプリング手法を採用せざるを得ず、1回当たりのサンプリング面積が異なる場合（第4章）、最適な調査方法の検討においては、①と②だけでなく、③も考慮に入れなければならない、さらに複雑になる。

港湾空港技術研究所資料 No.1330

2016. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。