

漂着海草・海藻に基づく藻場分布域の推定手法の開発

細川 真也^{*,**}・本間 翔太^{***}・大倉 翔太^{****}・田村 仁^{*****},*****

要 旨

海草や海藻によって形成される藻場の保全・再生・創出は、港湾周辺海域の生物多様性の保全や港湾脱炭素化推進計画に貢献する事が期待される。また、藻場を形成させる生物共生型港湾構造物は、これらへの貢献を可能とする。しかし、そのためには、構造物に形成させる海草・海藻の種をあらかじめ想定しておく必要があるが、港湾に生育できる海草・海藻の種レベルに関する情報は乏しい。海岸線における踏査は、安価であることから時空間的に広く調査が可能で、かつ、種レベルまでの把握が可能であり、潜水等のコストがかかる調査手法や種レベルの同定が難しい衛星写真等の解析手法を補完する、手法になる可能性がある。本研究では、この踏査に着目し、海草・海藻の種の生育分布を把握するための新たな手法としての有用性を検証した。調査は、既往の研究例で空白域が確認されている瀬戸内海の西側を対象として、およそ1か月の間隔で2年間実施した。この結果、漂着海草・海藻調査は、潜水等に基づく既往文献による報告に匹敵する数の種を検出した。また、特徴的な空間分布や季節性を有する種においては、漂着海草・海藻調査は、既往文献で報告されているものとよく一致した空間分布もしくは季節性を示した。本研究は、さらに、在データのみにより種の出現確率の推定が可能なフリーソフトウェアを用いる事で、漂着データを活用した種の出現確率の推定が可能であり、漂着データを活用する事で既往文献で報告されていた種の分布を更新できる事も示した。この更新された瀬戸内海における海草・海藻の出現確率は、生物共生型港湾構造物に形成させる海草・海藻の種の選定を支援する知見となる。また、本研究で提案した漂着海草・海藻の調査手法は、瀬戸内海だけでなく他の海域においても、比較的安価に海草・海藻の分布域の把握を可能にする事が期待される。

キーワード：生物共生型港湾構造物、種の分布、調査の空白域、在データ、出現確率

* インフラ DX 研究領域 ビッグデータ研究グループ長
** 海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ長
*** インフラ DX 研究領域 ビッグデータ研究グループ 研究官
**** 元海洋環境制御システム研究領域 海洋環境情報研究グループ 主任研究官（現国土技術政策総合研究所）
***** 海洋利用研究領域 上席研究官
***** インフラ DX 研究領域 上席研究官
〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5107 Fax：046-844-0575 e-mail: hosokawa@pmpat.go.jp

Method for estimating the spatial distributions of seagrass and seaweed based on their strandings

Shinya HOSOKAWA*,**
Shota HOMMA***
Shota OKURA****
Hitoshi TAMURA*****,*****

Synopsis

The conservation, regeneration and creation of seagrass and seaweed beds are expected to contribute to “the nature positive” and to the promotion of port decarbonization plans. Although pro-environmental port structures with seagrass and seaweed beds can also contribute to these goals, predicting the species of seagrass or seaweed is required to form on the structures. However, information on the spatial distribution in the species level of seagrass and seaweed is lacking. Surveying strandings on the coastline has the advantages of identifying seagrass and seaweed at the species level and performing over a wide area in time and space. The certainty in identifying species and cost-effectiveness of the method have the potential to complement the method of SCUBA diving techniques, which is exact to species-level identification but costly, and analyzing satellite photography, which is advantageous in detecting the spatial distribution widely but difficult for species-level identification. This study examined the usefulness of surveying strandings on the coastline as a new method for identifying the species distribution in seagrass and seaweed. The survey was conducted over a period of two years with approximately one-month intervals on the western side of the Seto Inland Sea (SIS), which includes a blank area of investigation in the previous research. Surveying strandings on the coastline resulted in high performance in detecting many species comparable to the previous reports based on SCUBA diving. In addition, the method determined spatial distribution or seasonality similar to that determined by the previous reports in species with unique spatial distribution and seasonality. This study used an application to estimate the occurrence probability using presence-only data. This application estimated the probability of species occurrence using data from surveying the strandings of seagrass and seaweed, and it was possible to update the species distribution that had been reported by previous research. The updated occurrence probability of seagrass and seaweed will support selecting seagrass and seaweed species to be cultivated on pro-environmental port structures in the SIS. In addition, the method will make it possible to determine the species distribution of seagrass and seaweed in other seas as well as the Seto Inland Sea at a relatively low cost.

Key words: Pro-environmental port structures, Species distribution, Blank area of investigation, Presence-only data, Occurrence probability

* Head of Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
** Head of Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
*** Researcher, Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
**** Senior Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
***** Principal Researcher, Coastal and Ocean Development Department
***** Principal Researcher, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5107 Fax : +81-46-844-0575 e-mail: hosokawa@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨

1. まえがき	4
2. 既往の知見の整理と考察	5
2.1 はじめに	5
2.2 瀬戸内海における海草・海藻の分布	5
2.3 流れ藻に関する研究のレビュー	9
2.4 漂着海草・海藻が分布域の推定に使える可能性	10
2.5 まとめ	11
3. 漂着海草・海藻の分布調査	11
3.1 はじめに	11
3.2 方法	11
3.3 結果	13
3.4 考察	20
3.5 まとめ	22
4. 漂着データを活用した出現確率の推定	22
4.1 はじめに	22
4.2 方法	23
4.3 結果と考察	27
4.4 まとめ	34
5. あとがき	34
5.1 結論	34
5.2 今後の応用	35
謝辞	35
参考文献	35
付録 A 表層水温データの取り扱いと海藻の水温応答の解析方法	39
付録 B 漂着海草・海藻の種組成の解析	43
付録 C バックグラウンドの設定が Maxent の解析結果に与える影響	44

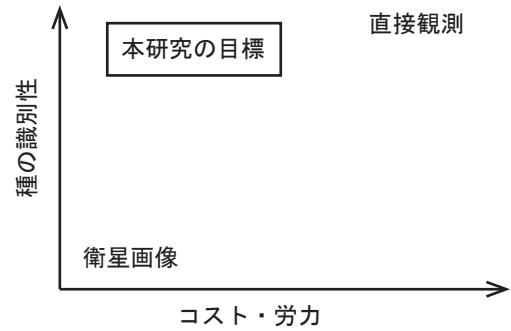
1. まえがき

海洋環境の保全・再生・維持は、生物多様性国家戦略2023-2030¹⁾等を背景に政府が総合的かつ計画的に講ずべき措置の1つとして第4期海洋基本計画の中で位置づけられている²⁾。港湾分野では、海洋基本計画に貢献する取り組みとして、干潟等の保全・再生・創出、覆砂、深堀跡の埋め戻し、生物共生型港湾構造物の普及等と共に、藻場の保全・再生・創出が推進されている。

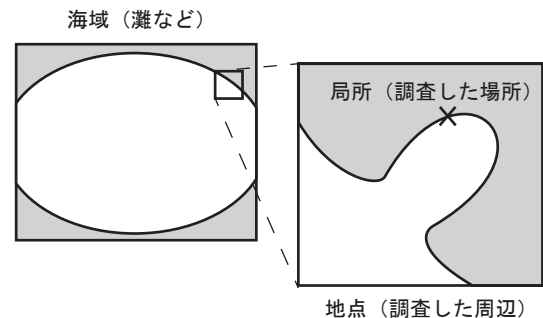
海草・海藻を基盤生物とする藻場生態系は、魚類の生育機能や物質循環等の機能を通じて、海域の環境に重要な役割を果たす事が知られている³⁾。さらに、最近では、そのCO₂の吸収機能や炭素貯留機能も着目されており⁴⁾、藻場生態系の存在は、森林、農地土壌炭素、都市緑化等と比較しても、気候変動の緩和に大きく貢献するとも考えられている⁵⁾。港湾脱炭素化推進計画は、我が国が掲げる脱炭素化社会の実現へ向けた重要な施策として位置付けられており、藻場の保全・再生・創出は、生物多様性の保全に資する取り組みという側面だけでなく、港湾脱炭素化推進計画の対象範囲の取り組みの1つとしても想定されている^{6,7)}。すなわち、港湾脱炭素化を推進したい港湾管理者にとっては、藻場の保全・再生・創出は、生物多様性の保全と脱炭素化の2つを同時に実現できる重要な選択肢である。

しかし、藻場生態系を構成する海草・海藻の種は多様であり、その保全・再生・創出は単純ではない。例えば、CO₂の吸収機能や炭素貯留機能の程度は種によって異なる事から⁵⁾、港湾脱炭素化推進計画に寄与するためには適切な種の選定が求められる。また、海草・海藻が基盤に定着もしくは付着する部位の形態も様々である事から、藻場生態系を形成させる構造物の基盤を選定する際には、あらかじめ海草・海藻の種を想定しておかなければならない。一方で、種によって生育環境が異なることから^{8)~11)}、そもそも、藻場の保全・再生・創出を目指している場所で生育出来ない種が存在し、計画者もしくは管理者の好みだけで種を選定できるわけではない。このように、それぞれの場所に生育出来る、もしくは出来ない種を把握することは、藻場の保全・再生・創出の計画者もしくは管理者にとって最も重要な手続きである。また、海草・海藻の分布は変遷しやすいことから、その把握を一度だけで済ませるだけでなく、定期的なモニタリングを行って知見を更新する事も重要である。

海草・海藻の種及びその分布を正確に把握するためには、潜水等によって直接観察する作業が不可欠である。しかし、その作業には、多くのコストや労力を必要とする。我が国では、第2章でも説明するとおり、多くの海藻相の調査が行われてきたが、それでも、藻場の保全・再生・創出を目指す管理者が対象とする局所的な空間スケールにまで海草・海藻の



図—1.1 本研究の狙い



図—1.2 空間スケールに関する用語の定義。

分布情報が網羅されているわけではない。一方で、最近では、ドローン等の無人航空機を使った空中写真や衛星に基づいた藻場分布の把握が行われるようになり、藻場が分布する面積は比較的に高い精度で分かるようになっている¹²⁾。しかし、これらの方法では、種を特定することは難しい。

潜水等による直接観測と空中写真や衛星画像の解析の利点と欠点は、図—1.1のように整理できる。これら2つの技術を併用してお互いを補完する事で、種別の分布の現状把握をより効率的に行う事ができるが、これら2つの技術とは異なる特徴を有する他の技術があれば、補完する組み合わせが増え、さらに効率的な分布の現状把握が可能になるものと期待される。

このことから、本研究では、海草・海藻藻場の分布の現状把握の必要性に着目し、潜水等による直接観測と空中写真や衛星画像の解析をさらに補完する技術の提示を目指した。この研究では、既存の2つのコスト・労力上及び種の識別性の利点と欠点を補う事に狙いを定め（図—1.1）、踏査に基づく事から低いコストと労力であり、かつ、直接に海草・海藻を観察する事で種を高い確度で識別できる漂着した海草・海藻の調査に着目した。

本研究では、比較的に既往文献が充実しており、調査の効果の検証がしやすい瀬戸内海を対象とし、まず、第2章

において、既往の知見を整理することで、藻場分布に関する知見の空白域の存在とその海域を特定し、さらに、海草・海藻の漂流及び漂着に関する知見を整理することで、漂着海草・海藻の調査の可能性を考察した。次に、第3章では、瀬戸内海で漂着した海草・海藻の調査を実施し、漂着海草・海藻が生育の時空間分布に対して、どれくらいの代表性があるのか検証した。最後に、第4章では、統計モデルを用いて海草・海藻の出現確率を推定した。この推定では、既往文献だけによる推定結果と漂着データを加えた場合の推定結果を比較する事で、漂着海草・海藻データを活用する事の効果や漂着海草・海藻データにエラーが含まれていた場合の影響も検証した。

本論文では、議論する空間スケールが様々であることから、空間スケールの用語を定義して読者の混乱を避けるよう心がけた。まず、研究の対象領域が瀬戸内海であるため、瀬戸内海の灘もしくはそれに近い空間スケールを海域として定義した(図—1.2) 次に、調査した周辺を地点と呼び、調査した場所を局所と呼ぶ事とした。

2. 既往の知見の整理と考察

2.1 はじめに

本章では、既往の知見を整理し、瀬戸内海における海草・海藻の空間分布に関する情報が不足している海域と、海草・海藻の分布情報を追加する事が重要な海域をまとめた。さらに、流れ藻の生態を整理し、漂着海草・海藻調査の可能性と課題を整理した。

2.2 瀬戸内海における海草・海藻の分布

(1) 文献に基づく分布域の把握

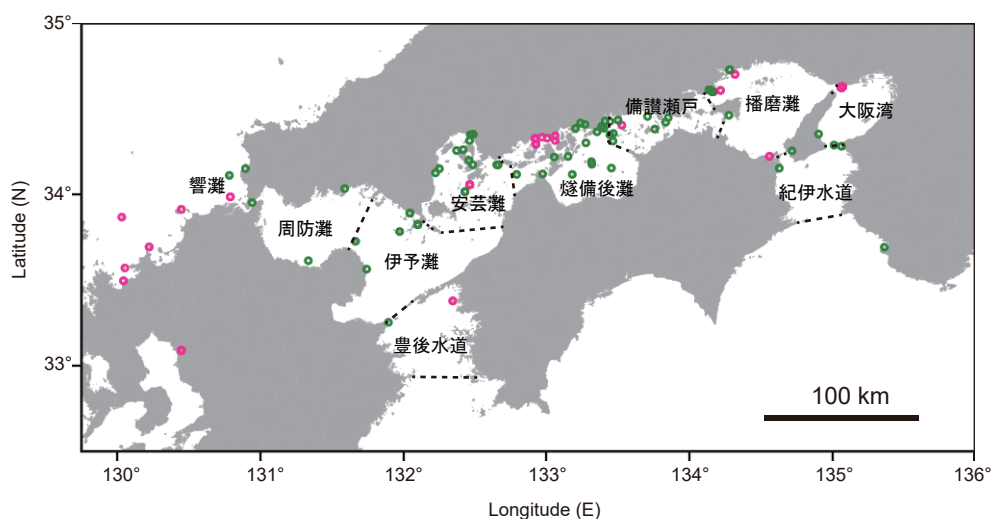
我が国の海草・海藻分布をまとめた古い資料として、日本水産資源保護協会(1984)^{13),14)}がある。このうちの1つ¹⁴⁾では、瀬戸内海の灘を図—2.1のとおりに分け、海藻相54種の分布海域を整理している。この灘の区分は、地形が入り組んだ燧燧後灘に違いがあるものの、吉田(2012)¹⁵⁾による区分とほとんど同じであり、他の多くの文献もこれらと同様の分けを採用している。

瀬戸内海の花草・海藻の分布を報告している論文は、他にもいくつかある(図—2.1)。この分布図によると、備讃瀬戸、燧燧後灘、安芸灘において比較的に空間的に密な報告がある。調査には、すべての種を対象とした網羅的な調査と種もしくは分類群に特定した調査の2つがあり、種もしくは分類群に特定した調査の方が空間的に広く分布しているが、周防灘、伊予灘、豊後水道及び紀伊水道に関しては、網羅的な調査例がほとんどなく、空白域となっている。なお、図—2.1で示した文献は、UMI-POCHI¹⁶⁾に収録されている。

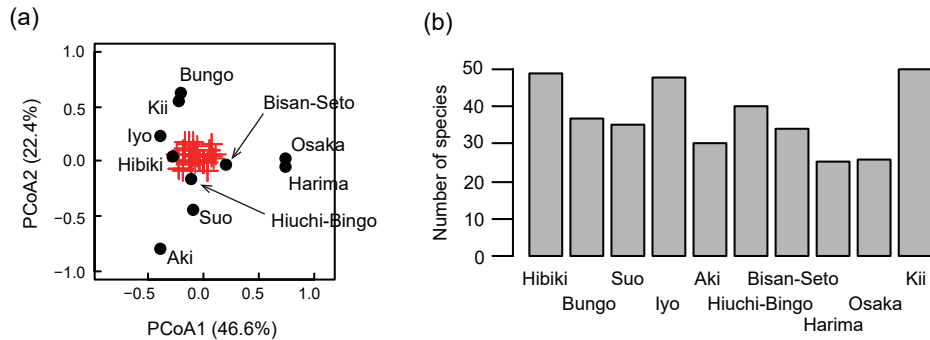
日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾の結果は当時の手法によって解析されているが、ここでは、改めて別の手法で解析し、分布の特徴を整理した。この再解析では、まず、2つの海域間の種組成の類似性を以下のSørensen類似度により評価した：

$$\text{Sørensen similarity} = \frac{2a}{2a + b + c} \quad (1)$$

ここに、 a は2つの海域に共通する種の数、 b と c は、それぞれ、片方の海域にしかない種の数である。これをすべての海域の間で求めることで類似度行列を作成し、この類似度行列に



図—2.1 瀬戸内海周辺の海藻分布の報告例。プロットは、文献によって報告された地点を示している。マゼンタと緑は、それぞれ、すべての種を対象とした網羅的な調査と特定の種を対象とした調査の地点である。海域の名称は、日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾による区分を示している。



図—2.2 瀬戸内海の高藻相。日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾で報告されている高藻相を再解析した結果。報告された海域ごとの高藻相について、(a)Sorensen 類似度を用いて主座標分析(PCoA)した結果と(b)種数を示している。なお、響灘の高藻相は、日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾では山口(日本海側)として記載されていたものを用いた。

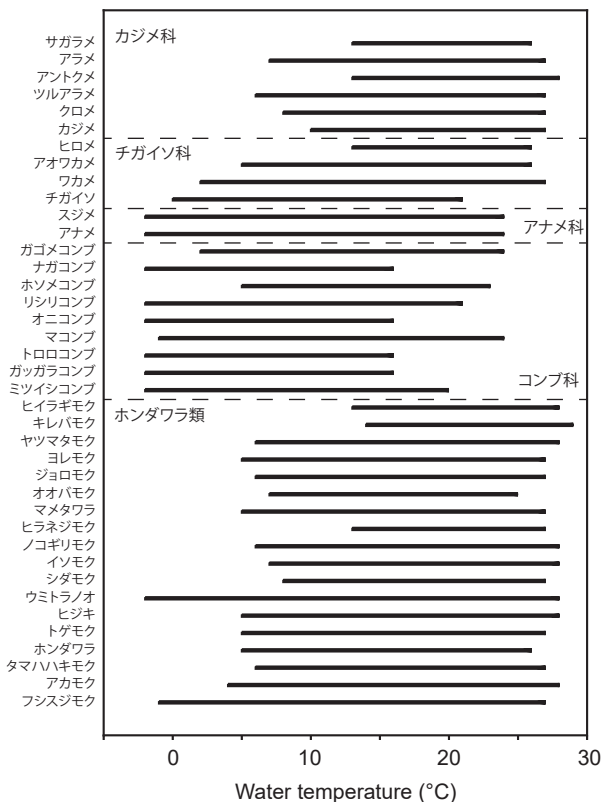
対して主座標分析(Principal Coordinate Analysis, PCoA)を実行した。この結果、大阪湾と播磨灘は、他の海域に比べて右側に偏った高藻相であった(図—2.2a)。これらの海域は、やや種の豊富さに乏しい海域であることから(図—2.2b)、他の海域との類似性が低く計算されたものと考えられる。日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾は、湾奥ほど出現種数が少ないため、瀬戸内海よりも他の海域との類似性が低くなると述べており、今回の再解析の結果と同じ事が考察されている。

PCoAの結果の左上には、地理的に遠く離れている紀伊水道と豊後水道が位置している(図—2.2a)。日本水産資源保護協会(1984)¹⁴⁾による類型では、豊後水道の高藻相は宮崎のものと類似し、黒潮の海流が影響している可能性が指摘されている。紀伊水道は、豊後水道から地理的に遠く離れているものの、両海域とも黒潮の影響を受けやすい事が、高藻相が近くなった理由であると考えられる。一方、吉田ら(2011)¹⁷⁾は、愛媛県宇和島市周辺が瀬戸内海と外海の高藻相の境目であるとし、この理由について、豊後水道では、水温の短い時間スケールでの変動のしやすさに空間的な違いがあり、それが高藻相の空間分布を支配している可能性を述べている。

大阪湾と播磨灘を除く瀬戸内海の高藻相は、PCoAの結果の左側で縦軸方向に分布している(図—2.2a)。紀伊水道と豊後水道を除けば、伊予灘が最も上側に位置し、安芸灘が最も下側に位置している。伊予灘と安芸灘は、それぞれ、大阪湾と播磨灘を除いて種数が多い海域と少ない海域であり(図—2.2b)、この結果として、これら海域間の類似性が低く計算されたものと考えられる。

(2) 水温から見た瀬戸内海における高藻分布

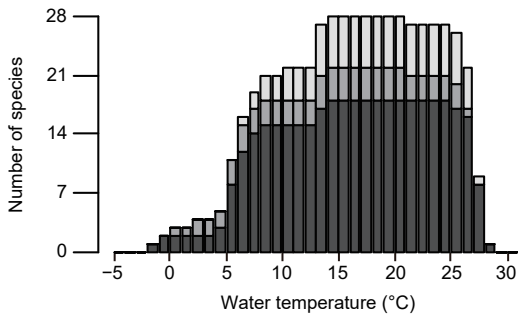
高藻の分布は、海水温と関連付けて整理される事が多い。馬場(2021)¹⁸⁾は39種の高藻について、空間的な分布域における水温に基づいて生育する水温範囲を整理している(図—2.3)。この図から、高藻が分布する水温範囲は種によ



図—2.3 高藻の分布域の水温範囲。馬場(2021)¹⁸⁾によってまとめられた結果を図化した。

て異なる事が分かる。

この39種のうち瀬戸内海に自生していないと考えられるコンブ科とアナメ科を除いたホンダワラ類、チガイソ科、カジメ科の28種に着目して、水温に対する種の豊富さを評価すると、ほとんどの種が分布する水温範囲は13°Cから27°Cまでである事が分かる(図—2.4)。その範囲を超えると、同じ1°Cの変化であっても、高温側の方で種数が急激に減少している。



図—2.4 水温と海藻の多様性との関係。馬場（2021）¹⁸⁾によってまとめられた海藻のうち、ホンダワラ類（濃い灰色）、チガイ科（灰色）、カジメ科（薄い灰色）の各種の分布域の水温範囲内の種数を示している。

このことは、水温が低水温化するよりも、高水温化する方が、海藻の多様性に対するインパクトが大きい事を意味している。

なお、カジメ、クロメ、ツルアラメは、現在は独立した種としては認められず、亜種として整理されている¹⁹⁾。さらに、アオワカメとヒロメは、ワカメと遺伝的に同じ種である可能性が指摘されている²⁰⁾。しかし、これらは別種として整理されることが多いので、本論文でも、それぞれ、1つの種として整理している。

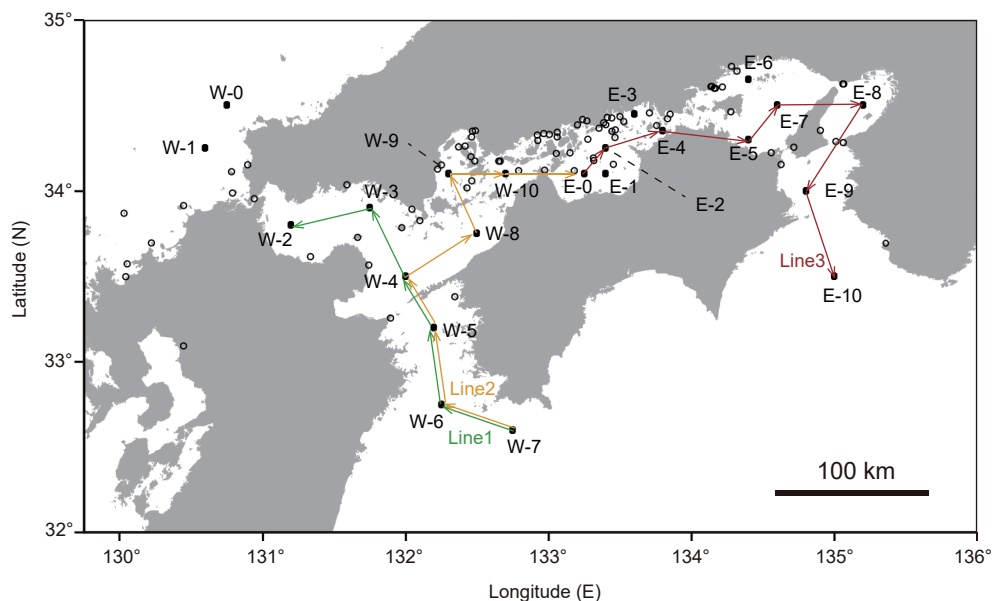
次に、瀬戸内海の海域ごとの表層水温の分布を整理する。表層水温は、衛星に搭載された MODIS によって得られた空間解像度が 1 km のものを用いた。閉鎖性の強い内湾では水温の鉛直構造が強い事が良く知られており、極表層の水

温を捉える MODIS データの鉛直方向の代表性が懸念されていたものの、表層から 1 m の水温であれば十分な代表性がある事が検証されている事から²¹⁾、本研究でもこれを用いた。なお、東京湾では、過去 20 年間の表層水温データを分析することで、湾内で水温上昇が起きている期間がある事、及び、その上昇には黒潮の蛇行が影響している可能性がある事が示されている²²⁾。

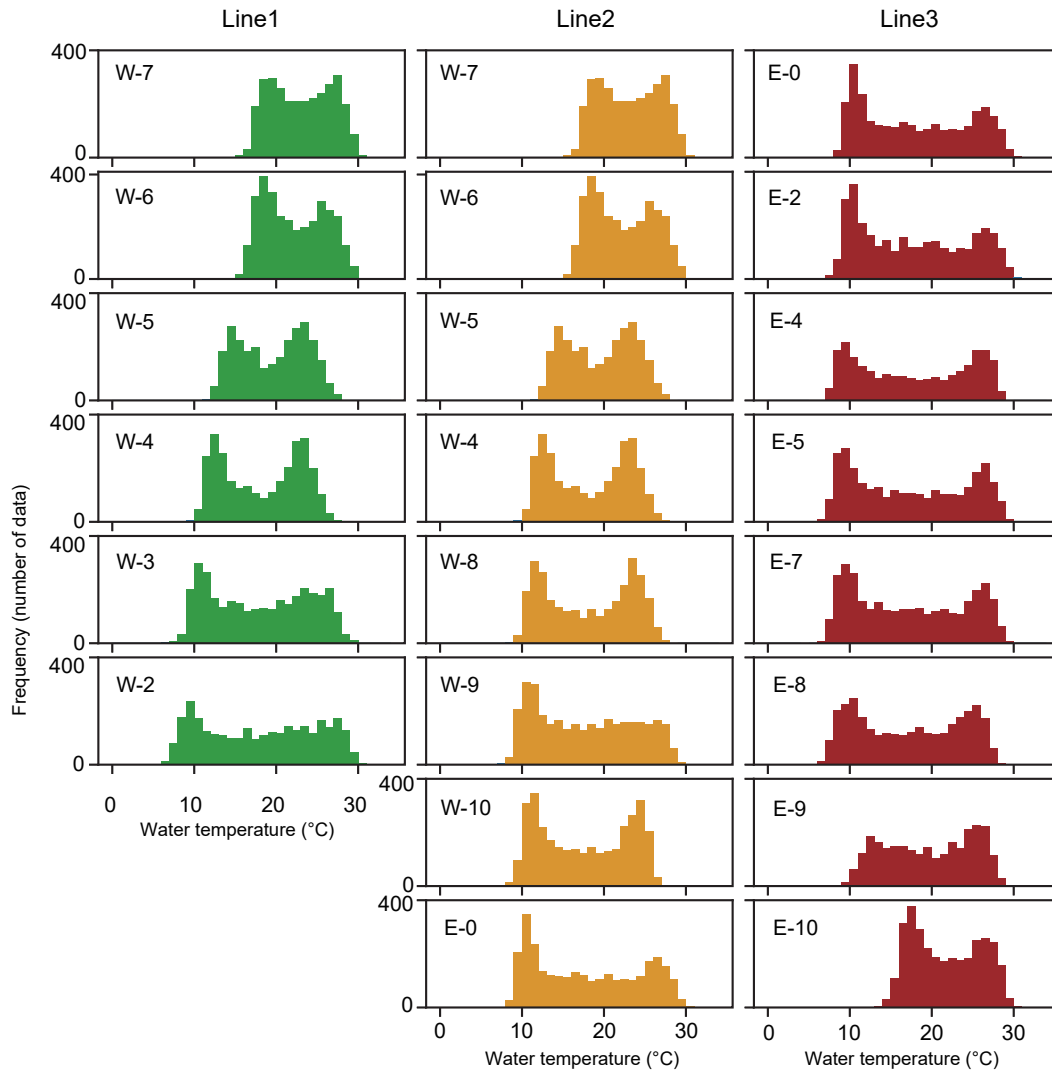
本研究では、2003 年から 2020 年までの 18 年間を対象として、瀬戸内海の水温の時空間分布を整理した。ただし、MODIS で取得される表層水温の空間解像度 1 km のすべてを対象にした 18 年分のデータ解析は大変であるため、平面的な代表として 22 点の検査点を選定し、これらの検査点に基づいて各海域の水温の特徴を解析した（図—2.5）。解析方法については、付録 A に詳細を説明した。

選定した検査点を通る 3 つの経路に着目し（図—2.5）、水温の時間方向の頻度分布を比較した（図—2.6）。これより、水温分布は場所によって異なる形状を示しており、外洋から瀬戸内海の奥に行くほど、全体的に低水温側へシフトし、かつ、分布の範囲が広がっている事が分かる。さらに、瀬戸内海の外洋との接続海域である W-4 及び W-8 では、水温分布が顕著な二山型の分布になっている点の特徴的である。安芸灘に位置している W-10 の水温分布も二山型の形状に近い。安芸灘の広島湾内に位置する W-9 では、高水温側の山が見られず、なだらかに高水温側に広がった分布となっている。

全 22 点の水温分布をコサイン類似度で比較すると、湾奥



図—2.5 瀬戸内海周辺の水温の検査点。Line で繋がれた検査点は、図—2.6 において水温分布の変化を表示した点と順番である。プロットは、図—2.1 で示した文献による地点を示している。

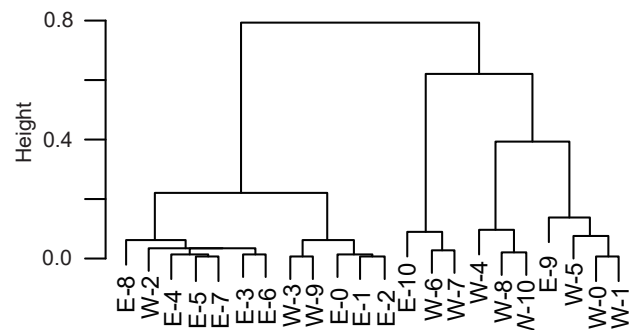


図—2.6 各検査点における水温の分布。2003年から2020年までの18年間の水温を1°Cのビン毎に集計している。縦軸は集計された回数を示している。

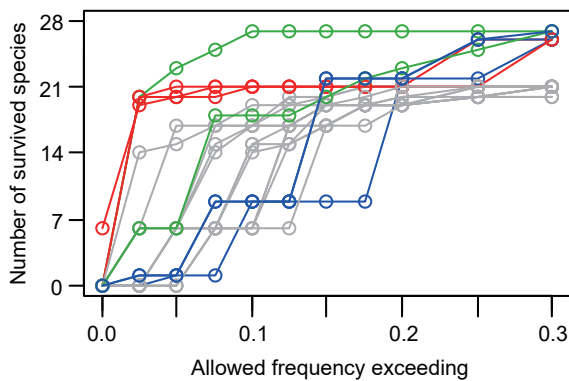
の検査点で構成されるクラスター（左側）と外洋及び外洋との接続海域の検査点で構成されるクラスター（右側）の2つに分けられた（図—2.7）。樹形図の右側のクラスターには、瀬戸内海の伊予灘と安芸灘の一部（W-4, W-8, W-10）が分類されている。

(3) 水温分布から見た海藻多様性の考察

水温と種の豊富さとの関係（図—2.4）を使って、瀬戸内海における海藻の種の豊富さのシミュレーションを行った。ここでは、馬場（2021）¹⁸⁾によって整理された海藻の各種の分布域の水温範囲に対して、水温分布が超過しても種が生存できるとする割合を設定し、2003年から2020年までの18年間の表層水温の分布の下で生存できる種数を計算した（付録A）。なお、許容する超過率が低いほど、各種の応答が馬場（2021）¹⁸⁾がまとめた水温範囲に厳密である事を意味



図—2.7 水温分布の類似性の樹形図。コサイン類似度により各検査点間の水温分布の類似度行列を求め、樹形図は類似度行列に基づきウォード法で作成した。



図—2.8 各検査点の水温分布に基づいた海藻の生存種数。生存種数は、馬場（2021）¹⁸⁾に基づき、付録Aで示す方法で求めている。横軸は、水温分布が種の分布域の水温範囲を超過することを許容した割合であり、この割合が低いほど、生存種数は馬場（2021）¹⁸⁾に厳密に求められた事を意味している。赤色、緑色、青色は、それぞれ、伊予灘及び安芸灘の検査点（W-4, W-8, W-10）、豊後水道（W-5）及び紀伊水道（E-9）、太平洋側（W-6, W-7, E-10）の検査点における生存種数を示している。他の検査点の生存種数は灰色で示している。青色のうちの2検査点は、重なっている。

している。

この結果、許容する超過率が高ければ、図—2.7の左側に分類される瀬戸内海の奥の検査点（灰色）では20種程度に留まっている（図—2.8）。しかし、それ以外の海域では、許容する超過率が高ければ、生存する種数が多く、検査点間の生存種数の差は見えにくい。許容する超過率が小さくなるに従って、生存種数は少なくなり、検査点間の差が明確に現れてくる。特に、太平洋側（青色）では、許容する超過率が0.2程度で種数が急激に少なくなっている。

瀬戸内海に位置するものの水温分布の類似性が他の瀬戸内海海域とは異なった伊予灘と安芸灘（図—2.7）は、いずれも、許容する超過率が低くなくても、他の瀬戸内海に比べると生存種数は多い（図—2.8）。しかし、安芸灘の中でも広島湾内に位置するW-9の表層水温の分布は、これらの分布とはクラスターが異なり（図—2.7）、許容する超過率が低いと生存種数が少なくなる（図—2.8）。これは、W-9の水温が高水温側に広く分布しているためである（付録A）。

先述した日本水産資源保護協会（1984）¹⁴⁾を再解析した結果では伊予灘と安芸灘との間に種数に差が見られた（図—2.2b）。表層水温の分布だけで見ると、安芸灘は海藻の分布に適した場所も含むが、高水温になりやすい広島湾内も含む。海藻・海藻の調査では、おそらく、人が関心を持ちやすい場所が対象となる傾向にあることから、広島湾内が調査場所として選定される傾向にあったものと推測される（図—2.1）。日本水産資源保護協会（1984）¹⁴⁾の報告では、この

結果、広島湾側の調査結果が反映され、安芸灘の種数が少なく報告されたものと考えられる。

日本水産資源保護協会（1984）¹⁴⁾を再解析した結果では、紀伊水道と豊後水道の海藻相が類似していた。これらの海域に対応する検査点はそれぞれE-9とW-5であり、表層水温の分布は類似している（図—2.7）。水温分布の許容超過率が0.3であれば、E-9とW-5のいずれも生存種数が最大である。W-5（緑色の1つ）は、許容する超過率を低くしても比較的高い種数が保たれているが、E-9（緑色のもう1つ）は許容する超過率を低くすると灰色と同程度に種数が減少している（図—2.8）。つまり、E-9とW-5の表層水温の分布はコサイン類似度で見ると類似しているものの、海藻の生存にとっては違いがあるという事である。W-5よりもE-9の方がやや高水温側に分布している事が、これらの間に違いが見られた要因であると考えられる（付録A）。

(4) 瀬戸内海の花草・海藻分布情報の整理

本節では、既に知られている海藻の分布域の水温範囲と18年間の表層水温データから、改めて、豊後水道、伊予灘及び安芸灘は多くの海藻の生育に適した海域である可能性を示した。今回の検証は、馬場（2021）¹⁸⁾に依存している事や海域を代表する数点の検査点に依存している等、さらなる検証の余地を残す。しかし、瀬戸内海の花水温分布の多様さから、海藻相を把握するためには、海水温の分布に応じた調査地点の配置が非常に重要である事は本節の解析結果からも明らかである。

特に、伊予灘や豊後水道は、水温分布から見て海藻相が多様な可能性が高い。また、これら海域では、クロメの分布域が外洋から瀬戸内海への変遷が起きている可能性が指摘されており、定期的なモニタリングの必要性が提案されている²³⁾。しかし、現状では、瀬戸内海の花草・海藻調査が行われている海域は、備讃瀬戸、燈備後灘、安芸灘に偏っており、伊予灘や豊後水道は、分布調査の空白域となっている（図—2.1）。

2.3 流れ藻に関する研究のレビュー

(1) 概要

流れ藻に関する研究は、Thielを中心としたグループにより既に、基質の挙動²⁴⁾、流れ藻と共に分散する生物群集²⁵⁾、生物地理学と進化²⁶⁾の3つの観点からレビューされている。我が国では、流れ藻に関する文献は1950年代には既に登場しており²⁷⁾、流れ藻を棲み家とする動物相や水産資源の輸送の観点からの研究が取り組まれてきた²⁸⁾⁻³⁰⁾。流れ藻自体に関する研究が始められたのは、おそらく1960年頃以降であり²⁸⁾、物理的な特性に着目した研究が進められている。漂着海藻・海藻の調査の可能性を考察する上では、この物理的な特性が重要となってくる。

海岸に漂着する海草・海藻は、多くの研究では打ち上げ藻や寄り藻と呼んでいるが、本研究では漂着海草・海藻として用語を統一する。また、漂流して輸送過程にあるものを流れ藻と呼んで用語を使い分ける。

(2) 漂着海草・海藻調査の事例

瀬戸内海における流れ藻の分布に関しては、2002年の報告がある³¹⁾。その主たる構成種は、アマモ (*Zostera marina*)、アカモク (*Sargassum horneri*)、タマハハキモク (*Sargassum muticum*)、ヒジキ (*Sargassum fusiforme*)、ヨレモク (*Sargassum siliquastrum*) であり、冬から初夏にかけてアカモク、タマハハキモク、ヒジキ、夏にはアマモ、秋にはヨレモクが高頻度で見られた事が報告されている。このように、漂着海草・海藻では、直接に藻体を観察できることから種レベルの解像度での分類が可能である。さらに、季節性も捉えられている。

(3) 漂着海草・海藻と流れ藻の割合

漂着海草・海藻や流れ藻は、植物体の全部または一部が基盤や母体から離れることで形成される²⁸⁾。母体から離れた植物体は、その後、浮力を有していれば流れ藻となるが、波や流れの物理過程によって海岸に打ち上げられて漂着海草・海藻になることもある。

若狭湾西部養老地先における現地調査の報告では、ホンダワラ類の海藻が枯死期にあたる4月から7月までに3割程度が倒伏し、流出したのは7割であった³²⁾。この流出したもののうち78.0%が流れ藻となって漂流し、海岸に漂着するのはわずか1.6%であると推定されている。一方、神奈川県松輪における漂着海藻の調査によると、海底地形が複雑な場所ではその場に留まりやすい事が報告されている³³⁾。

海草のアマモの種子に関しては、閉鎖的な港湾内において3割ほどがその場へ堆積するものと推定されている³⁴⁾。しかし、アマモの種子の比重は1.13であり海水よりも大きいことや、種子だけでなく種子を包む穂等が一体となって動態に影響することから、海藻の動態とは異なる可能性もある。

これらの研究例から、海草・海藻の流れ藻になったり海岸に漂着するまでの動態は、基質や母体から離れた後の植物体の状態や、それを輸送する物理環境等に依存し、場所によって異なるものと考えられる。

(4) 漂流する期間

海草・海藻が流れ藻になるかどうかは、おそらく、その比重によって決まると考えていい。一方、Tiel & Gutow (2005)は、流れ藻を含む浮遊物の漂流期間が決まる主要な過程として、浮き台が壊れる、浮力が消失する、海岸線への打ち上がる、の3つを考察している²⁴⁾。ここで、浮き台とは、浮遊物と共に漂流する動物にとっての浮遊物の事であり、動物による捕食や巣作りにより、空気が内包された浮遊物組織が壊されて水が侵入する事が浮き台が壊れる意味である。つまり、浮き台

が壊れる事は、浮力が消失する原因の1つを説明している。

動物による影響を受けにくい基質を有する浮遊物ほど漂流期間は長く、陸上植物の種子や果実は数年以上漂流する事もある²⁴⁾。一方で、流れ藻の漂流期間は、これらに比べると短い、それでも、数十日から2か月間程度²⁸⁾、もしくは260日を超えることもある²⁴⁾。実験によると、浮力が維持される期間は未成熟な藻体ほど長いようである³⁵⁾。アマモの穂の浮力が維持される期間は26日という実験結果があり³⁶⁾、海藻の漂流期間の報告よりも短い。海藻は流れ藻になった後も成長して組織を維持出来る事から、漂流期間も長くなるものと考えられるが、異なる機能を有する器官で構成されている海草においては、一部の器官に分離された流れ藻の組織は維持されずに浮力を消失するしかなく、海藻に比べて漂流期間が短いのかもかもしれない。

2.4 漂着海草・海藻が分布域の推定に使える可能性

上述で紹介した流れ藻の分布に関する報告³¹⁾は、漂着海草・海藻の調査によって海藻相を把握できる可能性を示している。しかし、瀬戸内海であれば、1か月の漂流期間で最大で100 km程度は遠くに輸送される³⁷⁾。生育場所が複数ある海域において、すべての海草・海藻がこれくらいの長距離で輸送されるのであれば、その漂流元を特定することは難しいであろう。

しかし、漂着海草・海藻が漂流元の藻場の場所を代表できるか否かは割合の問題であり、漂流元の植物体の量とそれが流れ藻となる割合、さらに、流れ藻が輸送される場所とその割合によって決まる。漂着場所から見ると、そこに到達した植物体の総量のうち、その近くから漂流した植物体の割合が十分に高ければ、漂着海草・海藻の調査が種の分布の推定手法として成り立つ。実際、瀬戸内海において漂流の確率的なばらつきを考慮した数値シミュレーションでは、1か月の漂流期間での輸送距離は、ポテンシャルで100 km程度であるものの、多くの漂流物は漂流元付近に留まる^{37),38)}。また、遺伝子解析の結果からも瀬戸内海の花藻・海藻が混ざりあっているわけではないという証拠も得られている。例えば、ワカメ属 (*Undaria*) は、瀬戸内海の中の地点毎で異なる特有の遺伝構造がある事が示されており³⁹⁾、少なくとも、ワカメ属は、瀬戸内海の中で量的に混ざりあって再生産を繰り返しているわけではないと考えていいであろう。アマモの遺伝子解析の事例では、海岸に漂着した葉が豊後水道、伊予灘、周防灘、安芸灘の海域間をまたいで輸送された事を示す証拠は確認されていない⁴⁰⁾。

以上より、漂着海草・海藻に基づいた調査は、漂流期間やそれに基づいた輸送距離のポテンシャルだけから考えると、生育分布を代表する手法とはならない可能性がある。しかし、量的な観点や瀬戸内海では海草・海藻の遺伝子解析の事

例から、生育分布の代表を有する調査手法として成り立つ可能性は十分に残されている。

2.5 まとめ

本章では、既往の知見を整理することで、伊予灘や豊後水道等の海域では海草・海藻の調査例がほとんどなく、瀬戸内海における海藻相の分布調査の空白域となっている事を示した。また、馬場（2021）によって整理されている海藻の分布域の水温範囲と18年間の水温データから、伊予灘や豊後水道は、多くの海藻が分布できる海域である事を示した。これらの海域は、種によっては分布域の変遷が起きている場所でもあり、海藻相の分布調査の空白域である事の解消が望ましい海域でもある。

本章では、また、漂着海草・海藻は、種レベルの解像度で分類でき、さらに季節性も捉えた事例を紹介した。この事例は、海岸に漂着した海草・海藻の調査が生育分布の把握に寄与できる可能性を示している。しかし、一方で、海草・海藻の漂流期間は、数十日から2か月程度とも言われており、この漂流期間から見積もられる流れ藻の輸送ポテンシャルだけから考えると漂着海草・海藻を調査を通じてそれらの生育分布を把握する事は難しい。

海岸に漂着した海草・海藻を調査することで、これらの生育分布の把握に応用できるかどうかについては、実際の海域で調査を行って検証する必要がある。次章では、海草・海藻の分布域調査の空白域が存在する瀬戸内海に着目して、漂着した海草・海藻を調査する事の有効性を検証する。

3. 漂着海草・海藻の分布調査

3.1 はじめに

前章の知見の整理と考察より、流れ藻は、高い識別性で種を特定できて季節性も捉えられる可能性が分かった。しかし、流動が比較的穏やかな瀬戸内海であっても、流れ藻は最大で100 km程度遠くに輸送されることから³⁷⁾、海岸に漂着した海草・海藻に基づいて生育分布を把握できる確証を得る事は出来なかった。海岸に漂着した海草・海藻が、生育分布の把握に応用できるかどうかの判断は、実際の海域で調査を行った検証に基づく必要がある。

漂着した海草・海藻が生育分布を代表できているかどうかを確認する方法としては、幾つかの方法が考えられる。最もシンプルな方法は、生育の時空間分布と同時に漂着の時空間分布を調べる方法である。また、第2章でも紹介した遺伝子をマーカーとして使う方法^{39),40)}は、種の分布のみを照らし合わせるよりもさらに高い精度で漂流元を推定できる。しかし、生育の分布を潜水作業等により調査するだけでも膨大なコストがかかってしまい、遺伝子をマーカーとして使ったとしても

どれくらいの空間解像度で漂流元を特定できるか分からず、これらの方法によるアプローチは、コストに対して得られる成果が不確実である。

漂着海草・海藻の時空間的なパターンから生育の時空間分布の代表性を類推する方法も1つの案である。このアプローチでは、個別の漂着海草・海藻の漂流元を特定する事までは出来ないであろうが、そのパターンが生育分布に関する既知の時空間パターンと一致していれば、高い確度で漂着海草・海藻調査が機能すると言えるし、既知の情報がなくても何らかのパターンがあれば、この調査手法が機能している可能性は高い。漂流元の不確かさを残しつつも、それを解析技術でカバーする事で、コストを抑えた実務に応用可能な方法になり得る。

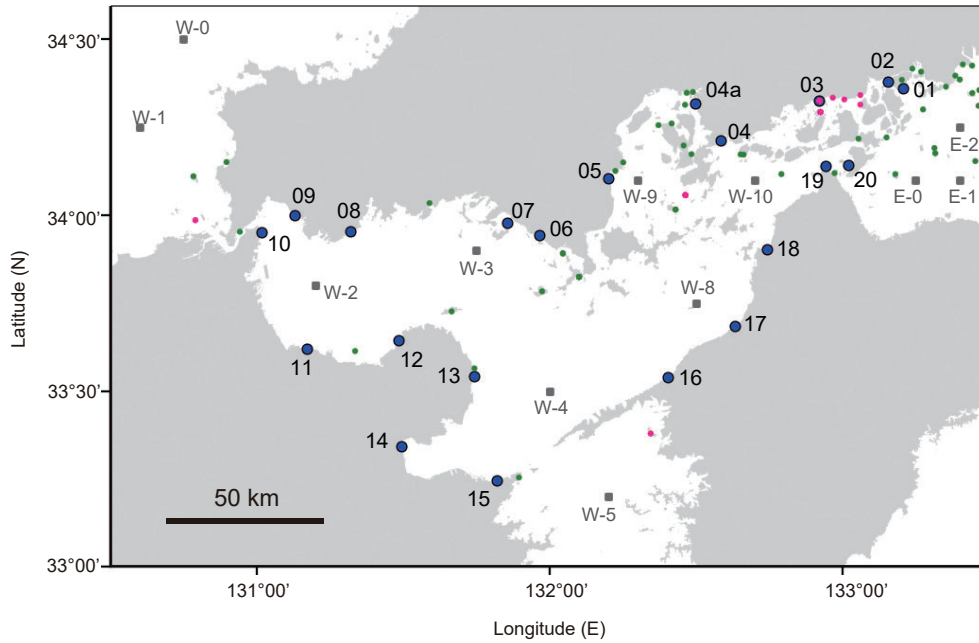
本章では、第2章で着目した瀬戸内海を対象として、観測された種の時空間的な分布パターンから、この調査手法による生育分布の代表可能性を検証した。さらに、この調査手法の本来の狙いである低いコストと労力を活かした時空間的に密な調査が可能か、その有用性も検証した。

調査では、可能な限り種のレベルまで同定して海藻相を網羅的に観察し、多くの種の時空間分布のパターンを解析した。この検証では、主にエントロピー増大の法則に着目した。流れ藻がいつまでも漂流し、かつ、それが広く空間的に乱雑に拡がった状態は、エントロピーが最も高い状態となる。観測結果がエントロピーが最も高い状態にあるかどうかを評価することで、少なくとも、漂着海草・海藻の時空間的なパターンの有無を評価する事ができる⁴¹⁾。ただし、この評価だけでは検証としては弱いため、個別の種ごとに既往文献で報告されている空間分布及び季節性と比較することで、時空間パターンにおける矛盾の有無についても検証した。有用性の検証においては、海草・海藻調査の空白域における効果に着目しつつ、今後の展望を考察した。

3.2 方法

(1) 調査方法

漂着海草・海藻の調査は、既往の文献による空白域を含む瀬戸内海西側を対象とした（図—3.1）。調査場所においては、徒歩により、砂浜や岩礁に打ちあがった海草・海藻を観察した（図—3.2）。打ち上がった海草・海藻には、新鮮なものだけでなく乾燥したものも混在していたが、記録の対象は新鮮なものに限定した。鮮度は、目視により判断した。調査では、漂着した量を定性的に記録し、種は付着器等に着目して専門家により同定した。記録は、位置及び撮影時刻の情報を同時に取得できるカメラを用いた撮影により行った。カメラで撮影した画像データについては、港湾空港技術研究所のビッグデータ研究グループが運用するオープンデータプラットフォーム（UMI-POCHI）¹⁶⁾から閲覧することができる。



図—3.1 漂着海草・海藻の調査地点（紺色）。マゼンタと緑のプロットは、既往文献によって報告されている調査地点（図—2.1）、灰色は図—2.5に示した水温の検査点である。



図—3.2 漂着海草・海藻の調査風景。

調査は、1回あたり4日から6日をかけて21地点を対象として実施した（表—3.1）。地点06, 09, 15は、アクセスのしやすさを考慮して、2022年7月にそれ以前の地点から少し修正した。04aを除く20地点では計16回の調査を実施した。04aでは2022年7月に工事で立ち入りが出来なかったため、調査回数は計15回であった。

(2) データ収集と解析

まず、いずれの種も観測されなかった地点と調査月に着目し、その回数を計数した。次に、観測された種数及び特定の種の時空間的な出現パターンを解析した。種数については、地点、調査月、及びこれらの交互作用を説明変数として考慮し、分散分析（ANOVA）によりその変動因子を検定

した。検定では、R⁴²⁾のデフォルトの関数であるaovを用いた。

種数の分散分析で説明変数に有意な効果が見られない場合は種の組成としてエントロピーが高い状態にある可能性を示唆する。このことから、第1段階として、種数の地点と調査月の違いに着目して、漂着海草・海藻の時空間的なパターンを評価した。さらに、各種の時空間分布のエントロピーに着目して観測結果の乱雑さを評価した。本研究では、これらの2段階の評価により、漂着海草・海藻の時空間的なパターンの有無を検証した。

それぞれの種の分布のエントロピーについては、以下の情報エントロピー（ H_2 ）を使って、空間方向と時間方向に分けて評価した：

$$H_2 = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (2)$$

ここに、 p_i はある種の出現確率である。 i 及び N は空間方向と時間方向のいずれでも定義でき、本調査の場合、時間と空間のそれぞれの N は16と21である。例えば、空間方向の情報エントロピーを評価する場合、ある地点 i における出現の有無は、調査期間中に1度でも観測されたか、もしくはされなかったかで評価した。1度でも出現した総地点数を数え、その逆数を出現した地点における出現確率とした。1度も出現しなかった地点における出現確率は0（ $p_i = 0$ ）とし、 $0 \times \log_2 0$ は0として定義した。

時間方向の情報エントロピーは、ある調査月 i にいずれかの地点で観測されたか否かで評価し、空間方向と同様の考

表—3.1 漂着海草・海藻の調査日と解析上の名称及び説明

調査回	調 査 日	名 称	説 明
1	2021 年 09 月 21 日から 2021 年 09 月 24 日まで	Sep	
2	2021 年 10 月 22 日から 2021 年 10 月 26 日まで	Oct	
3	2021 年 11 月 23 日から 2021 年 11 月 27 日まで	Nov	
4	2021 年 12 月 20 日から 2021 年 12 月 24 日まで	Dec	
5	2022 年 01 月 05 日から 2022 年 01 月 09 日まで	Jan	
6	2022 年 01 月 27 日から 2022 年 01 月 31 日まで	Feb	
7	2022 年 07 月 06 日から 2022 年 07 月 10 日まで	Jul	04a は工事で立ち入り禁止のため調査できず
8	2022 年 08 月 01 日から 2022 年 08 月 05 日まで	Aug	
9	2022 年 08 月 29 日から 2022 年 09 月 02 日まで	Sep	
10	2022 年 10 月 01 日から 2022 年 10 月 04 日まで	Oct	
11	2022 年 10 月 31 日から 2022 年 11 月 04 日まで	Nov	
12	2022 年 11 月 29 日から 2022 年 12 月 03 日まで	Dec	
13	2023 年 01 月 05 日から 2023 年 01 月 10 日まで	Jan	
14	2023 年 02 月 02 日から 2023 年 02 月 07 日まで	Feb	
15	2023 年 03 月 12 日から 2023 年 03 月 16 日まで	Mar	広島港湾空港技術調査事務所からの提供データ
16	2023 年 05 月 08 日から 2023 年 05 月 12 日まで	May	広島港湾空港技術調査事務所からの提供データ

え方に従い出現確率を推定した。空間方向と時間方向の完全にランダムな場合（最も乱雑な状態）の出現確率は、それぞれ、 $1/21$ 及び $1/16$ であり、この場合の情報エントロピーは、それぞれの中での最大となる。これを最大情報エントロピーと呼び、情報エントロピーが最大情報エントロピーに一致していれば、空間もしくは時間方向に特定のパターンは存在しないことから、もはや、観測結果から有益な情報を抽出する事は出来ないと判断できる⁴¹⁾。この場合、漂着海草・海藻の調査データから生育分布を推定する事は難しいと判断される。

なお、種数の比較においては、漂着海草・海藻調査の結果から、種の豊富さの違いを評価する事も出来るが、そのためには、公平な比較のための観測者によるサンプリングエフォートの考慮が重要になる^{43)–46)}。調査の対象が、個体ベースとサンプルベースの異なる2つのサンプリングエフォートの考え方のうちのどちらに適しているか理解した上で、調査手法を選択すれば種の豊富さの評価は可能となるが⁴⁷⁾、本研究の漂着海草・海藻の調査を個体ベースの考え方に基づいて実施しようとする、砂浜や岩礁に打ちあがった無数の個体を確率的にバイアスの無いようサンプリングする必要がある現実的ではない。また、サンプルベースの考え方に基づいて実施しようとする、調査地点間で砂浜や岩礁の距離を統一する必要があるが、これも1日に複数の地点を調査しなければならないので容易ではない。以上のように、本研究で採

用した調査手法は、種の豊富さの比較を主目的にしていなことから、多様性の比較は行わない。ただし、種数の情報は分布の確からしさの検証にも使える事から、十分に注意して考察する。

3.3 結果

(1) 結果の概要

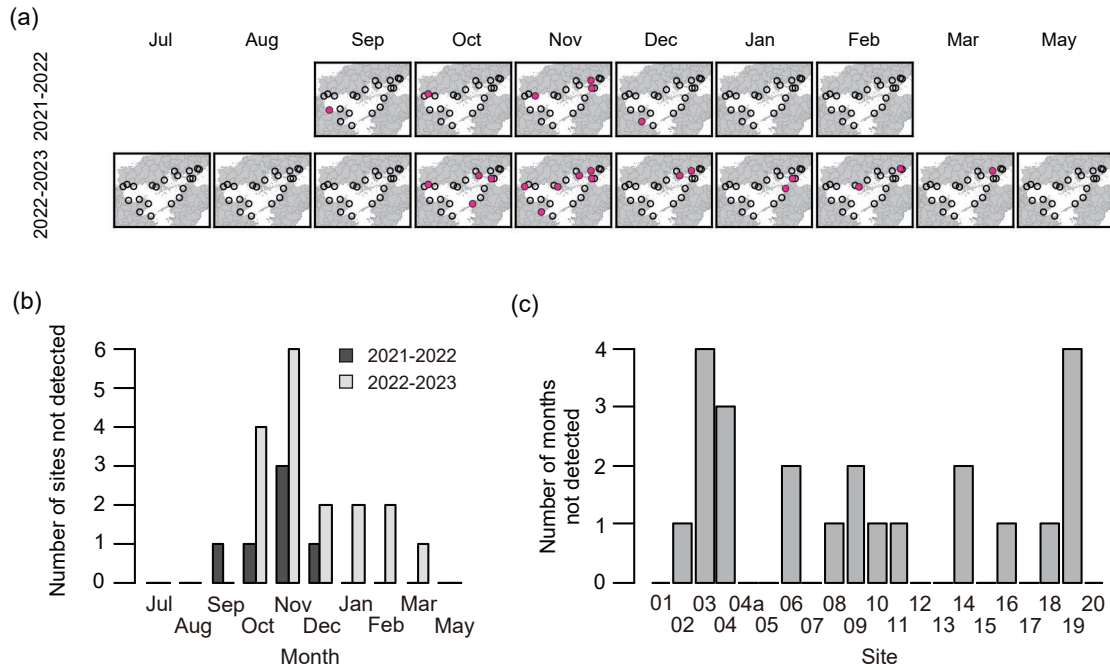
調査期間中に観測された海草・海藻は、計 71 種であった（表—3.2）。このうち、第 2 章で引用した日本水産資源保護協会¹⁴⁾でも報告された種は 23 種であった。残りの 48 種は文献では報告されていない。逆に、日本水産資源保護協会¹⁴⁾で報告されているが本調査では観測されなかった種は 31 種であった。日本水産資源保護協会¹⁴⁾の報告は、本調査のおよそ 40 年以上前のものであり、海藻相が変遷している可能性は十分にあるが、少なくとも、漂着海草・海藻が従来調査に比べて劣っている事はないと言える。むしろ、2 年以内の短期間で過去の文献で報告されている種数に匹敵する程度の種を観測できている点は注目に値する。

(2) 漂着海草・海藻が観測されなかった地点と調査月

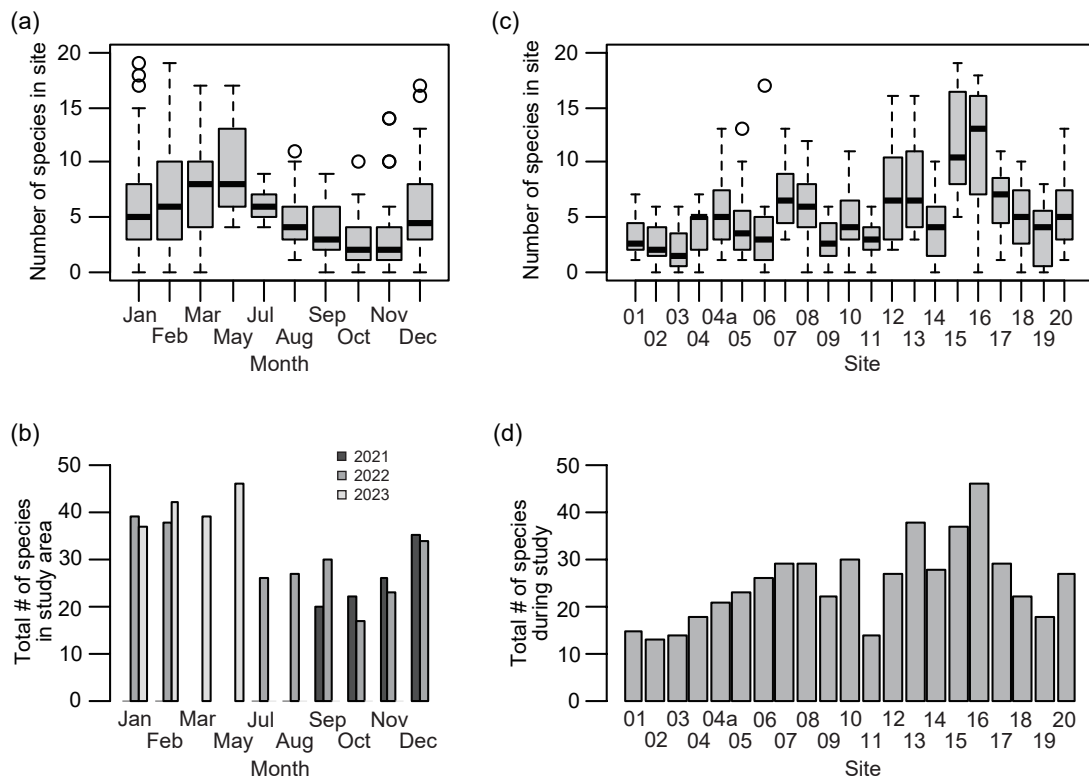
漂着海草・海藻がいずれの地点でも全く観察されなかった調査月はない（図—3.3a）。ただし、観測されなかった地点の数のピークが 11 月に見られ（図—3.3b）、地点 03 と 19 では計 16 回の調査のうち、4 回で海草・海藻が全く観察されなかった（図—3.3c）。なお、4 月と 6 月に調査は行っておらず、

表—3.2 漂着海草・海藻の調査によって観測された種と日本水産資源保護協会（1984）^{14）}における記載の有無。記載の有無において、フラグ（1）が立っている種は日本水産資源保護協会（1984）でも報告されていた事を意味している。

門	綱	目	科	種名	学名	記載の有無
緑色植物門	緑藻綱	アオサ目	アオサ科	アオリ属	<i>Enteromorpha</i> sp.	1
				アオサ属	<i>Ulva</i> sp.	
		シオグサ目	シオグサ科	シオグサ属	<i>Cladophora</i> sp.	
				ジュズモ属	<i>Chaetomorpha</i> sp.	
		ミル目	ミル科	ミル	<i>Codium fragile</i>	
				エゾミル	<i>Codium yezoense</i>	
		アミシグサ目	アミシグサ科	ミル属	<i>Codium</i> sp.	
				エゾヤハズ	<i>Dictyopteris divaricata</i>	
				ヤハズグサ	<i>Dictyopteris latiuscula</i>	
				ヘラヤハズ	<i>Dictyopteris prolifera</i>	
				ウミウチワ	<i>Padina arborescens</i>	
				アミシグサ科	Dictyotaceae	
				ヤハズグサ属	<i>Dictyopteris</i> sp.	
				イシゲ	<i>Ishige okamurae</i>	
				イロロ	<i>Ishige sinicola</i>	
				ホソクビワタモ	<i>Colpomenia phaeodactyla</i>	
不等毛植物門	褐藻綱	ナカマツモ目	イシゲ科	フクロノリ	<i>Colpomenia sinuosa</i>	1
				カゴメノリ	<i>Hydroclathrus clathratus</i>	
		カヤモノリ目	カヤモノリ科	カヤモノリ	<i>Scytosiphon lomentaria</i>	1
				カヤモノリ科	Scytosiphonaceae	
		ムチモ目	ムチモ科	ムチモ	<i>Cutleria cylindrica</i>	
				ワカメ	<i>Undaria pinnatifida</i>	
		コンブ目	チガイソ科 コンブ科	クロメ	<i>Ecklonia cava</i> subsp. <i>kurome</i>	1
				コンブ科	Laminariaceae	
		ヒバマタ目	ウカノモク科 ホンダワラ科	シヨロモク	<i>Myagropsis myagroides</i>	1
				アキヨレモク	<i>Sargassum autumnale</i>	
				マシリモク	<i>Sargassum carpophyllum</i>	
				シダモク	<i>Sargassum filicinum</i>	
				ホンダワラ	<i>Sargassum fulvellum</i>	
				ヒシギ	<i>Sargassum fusiforme</i>	
				イソモク	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	
				アカモク	<i>Sargassum horneri</i>	
				ノコギリモク	<i>Sargassum macrocarpum</i>	
				トゲモク	<i>Sargassum micracanthum</i>	
				タマハハキモク	<i>Sargassum muticum</i>	
				ヤツマタモク	<i>Sargassum patens</i>	
				マメタワラ	<i>Sargassum piluliferum</i>	
				ヤナギモク	<i>Sargassum ringgoldianum coreanum</i>	
				ヨレモク	<i>Sargassum siliquastrum</i>	
				ウミトラノオ	<i>Sargassum thunbergii</i>	
				イトヨレモク	<i>Sargassum trichophyllum</i>	
				ヨレモクモドキ	<i>Sargassum yamamotoi</i>	
				エントウモク	<i>Sargassum yendoi</i>	
				ホンダワラ属	<i>Sargassum</i> sp.	
紅色植物門	紅藻綱	サンゴモ目	サンゴモ科 (Amphiroideae 亜科)	カニノテ属	<i>Amphiroa</i> sp.	
				サンゴモ科 (Corallinoideae 亜科)	<i>Corallina officinalis</i>	
		サンゴモ科 (Corallinoideae 亜科)		サンゴモ	<i>Corallina pilulifera</i>	1
				ビリハ	<i>Corallina pilulifera</i>	
		テングサ目	テングサ科	マクサ	<i>Gelidium elegans</i>	1
				スキノリ	<i>Chondracanthus tenellus</i>	
		スキノリ目	スキノリ科	ツノマタ属	<i>Chondrus</i> sp.	
				スキノリ科	Gigartinaceae	
			ムカデノリ科	ウツロムカデ	<i>Grateloupia filicina</i> var. <i>porracea</i> f. <i>lomentaria</i>	1
				ムカデノリ属	<i>Grateloupia</i> sp.	
				イバラノリ属	<i>Hypnea</i> sp.	
				キシノオ	<i>Phacelocarpus japonicus</i>	
				オキツノリ	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	
				ホソユカリ	<i>Plocamium cartilagineum</i>	
				ユカリ	<i>Plocamium telfairiae</i>	
				カバノリ	<i>Gracilaria textorii</i>	
				オゴノリ属	<i>Gracilaria</i> sp.	
				フシツナギ	<i>Lomentaria catenata</i>	
		マサコシバリ目	ワツナギソウ科 マサコシバリ科	タオヤギソウ	<i>Chrysomenia wrightii</i>	1
				ワツナギソウ	<i>Champia parvula</i>	
		イキス目	ダシニア科 コノハノリ科 フシマツモ科	ダシニア科	Dasyaceae	1
				アヤニシキ	<i>Martensia fragilis</i>	
				ユナ	<i>Chondria crassicaulis</i>	
				ソゾ属	<i>Laurencia</i> sp.	
				イトグサ属	<i>Polysiphonia</i> sp.	
				ウミシルモ属	<i>Halophila</i> sp.	
被子植物門	単子葉植物	オモタカ目	トチカカミ科 アマモ科	ゴアマモ	<i>Zostera japonica</i>	1
				アマモ	<i>Zostera marina</i>	



図—3.3 漂着海藻・海藻が観測されなかった地点と調査月。(a) 各調査月において漂着海藻・海藻が観測されなかった地点 (マゼンタ), (b) 月ごとの 21 地点中 (ただし, 2022 年 7 月は 20 地点中) で観測されなかった地点数, 及び (c) 地点ごとの 16 回中 (ただし, 04a は 15 回中) で観測されなかった調査月数を示している。なお, 2021-2022 の Feb の結果は, 2022 年 1 月 31 日に実施された結果である。



図—3.4 漂着海藻・海藻の種の豊富さ。(a) 調査月当たりの種の豊富さの地点間の変動と (b) 調査月当たりのすべての地点の総種数を示している。さらに, (c) 地点別に見た調査期間中の種の豊富さ変動 (箱ひげ図) と (d) 地点別の調査期間中の総種数を示している。

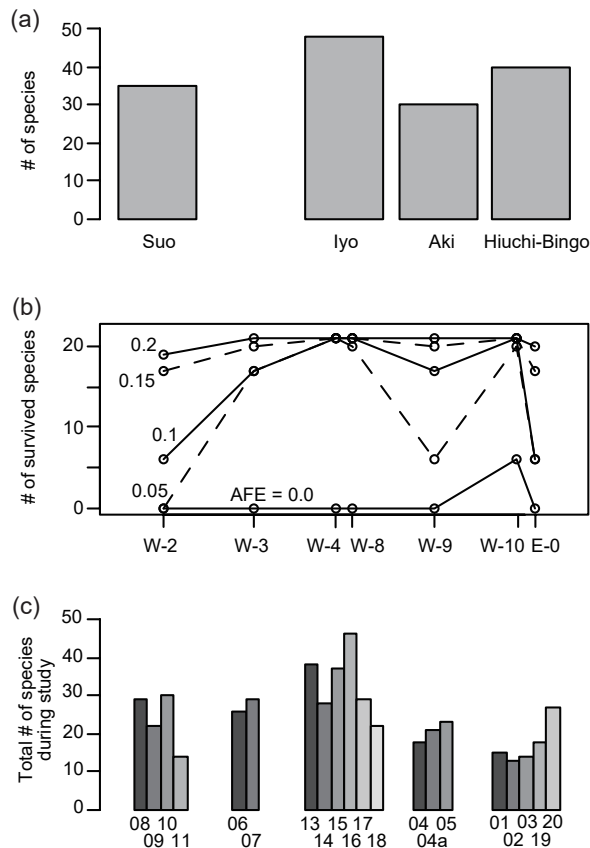
データは無い。

(3) 種数

漂着海藻・海藻の地点当たりの種数は、月間で統計的に有意な差があり (ANOVA; $F_{9,126} = 18.7$, $p = 2 \times 10^{-16}$), 10月と11月に少なく、5月に多くなる季節性があった (図—3.4a)。種数が少ない10月と11月は、漂着海藻・海藻が観測されない地点の数にピークが見られた月でもある (図—3.3b)。種数の中央値は、11月から12月にかけて倍に増加していた (図—3.4a)。

地点当たりの種数は、地点間で統計的に有意な差があり (ANOVA; $F_{20,126} = 26.5$, $p = 2 \times 10^{-16}$), それが調査月によって異なることを意味する交互作用も見られた ($F_{179,126} = 1.85$, $p = 1.4 \times 10^{-4}$)。佐田岬周辺に位置する地点15と16における種数は、観測されない時もあったが、中央値は他の地点よりも倍近く多かった (図—3.4c)。

各月において、すべての地点で観測された総種数は (図

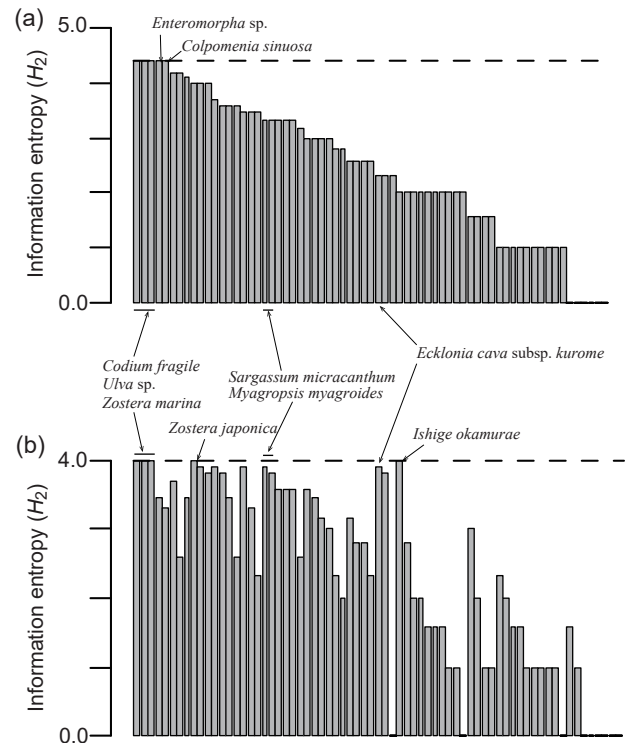


図—3.5 海藻・海藻の種の豊富さ。(a) 日本水産資源保護協会¹⁴⁾, (b) 馬場 (2021)¹⁸⁾ 及び水温分布による検討結果 (AFEは許容する超過率), 及び (c) 漂着海藻・海藻の結果を比較している。なお、W-3と地点06及び07は、周防灘と伊予灘の境界付近に位置しており、該当する種数を示しにくいことから、日本水産資源保護協会¹⁴⁾の図は空白としている。

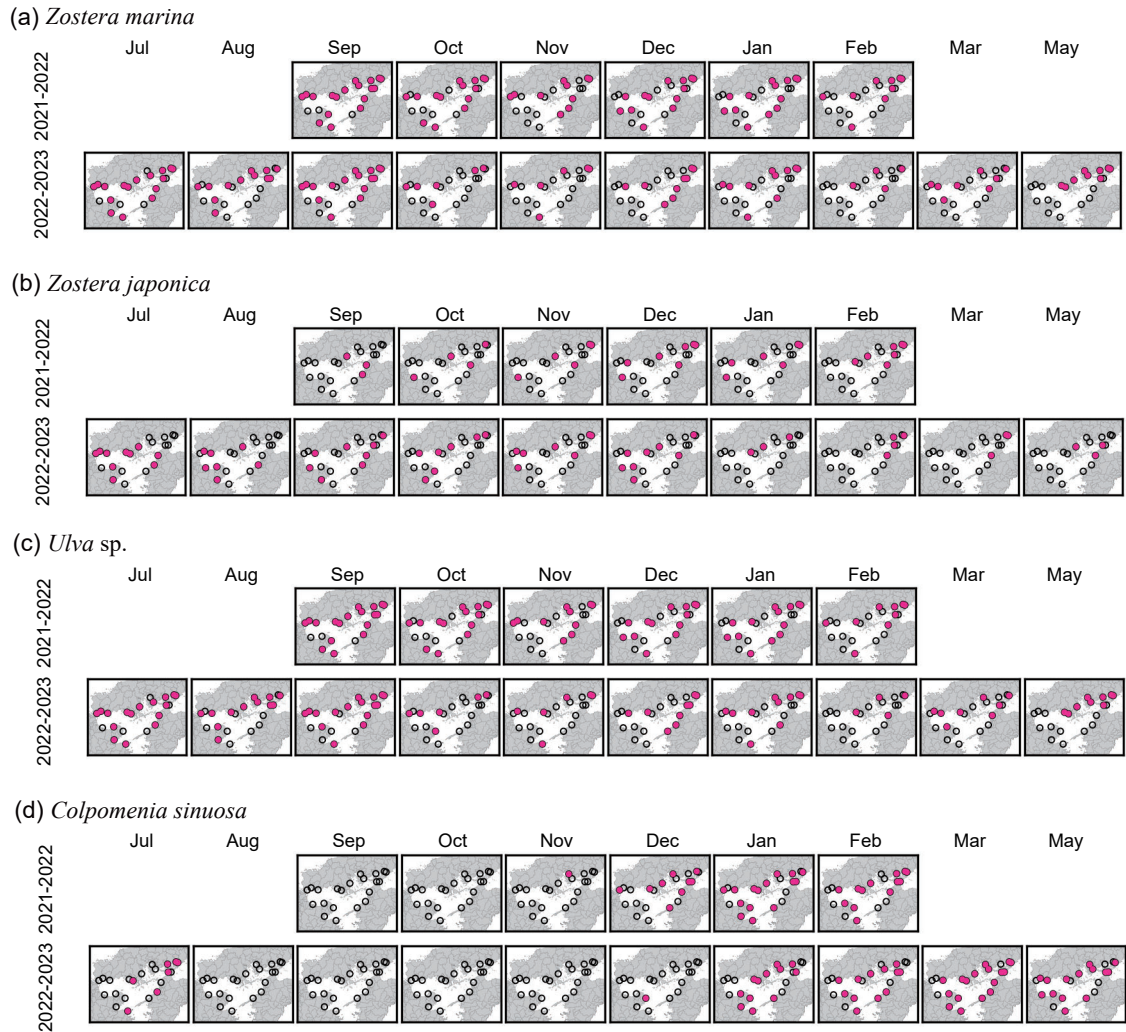
—3.4b)、地点当たりの種数 (図—3.4a) と同様の季節変化を示していた。同様に、各地点における調査期間中に観測された総種数 (図—3.4d) も地点当たりの種数 (図—3.4c) と同様の場所的な変化を示していた。調査期間中に観測された総種数は、伊予灘に位置する地点16で最も多く、次に、同じく伊予灘に位置している地点13と15で多かった (図—3.4d)。この結果は、日本水産資源保護協会¹⁴⁾ (図—3.5a) や馬場 (2021)¹⁸⁾ 及び水温分布から推定される種の豊富さ (図—3.5b) とよく一致している。

(4) 種の分布の情報エントロピー

いくつかの種の情報エントロピーは、最大情報エントロピーと一致していた。ミル (*Codium fragile*), アオサ属 (*Ulva* sp.), アマモ (*Zostera marina*), アオリ属 (*Enteromorpha* sp.), フクロノリ (*Colpomenia sinuosa*) は、空間方向の情報エントロピーが最大情報エントロピーに一致する種であり (図—3.6a), そのうち、ミル, アオサ属, アマモは、時間方向の情報エントロピーも最大情報エントロピーに一致していた (図—3.6b)。つまり、これら3種は、空間及び時間的な分布パターンがない種である。これらの他、コアマモ (*Zostera japonica*) とイシゲ (*Ishige okamurae*) も時間方向の情報エ



図—3.6 漂着海藻・海藻の観測結果のエントロピー。(a) 空間方向の情報エントロピーと (b) 時間方向の情報エントロピーを示している。観測結果の情報エントロピーは棒グラフで示し、最大情報エントロピーは点線で示している。



図—3.7 漂着海草・海藻の種別の観測結果。(a) アマモ (*Zostera marina*), (b) コアマモ (*Zostera japonica*), (c) アオサ類 (*Ulva* sp.), (d) フクロノリ (*Colpomenia sinuosa*) が観測された地点をマゼンタで示している。中抜きは、確認できなかった場所を示している。

ントロピーが最大に一致する種であった。トゲモク (*Sargassum micracanthum*) とジョロモク (*Myagropsis myagroides*) は、主座標解析 (PCoA) によって、アマモ、コアマモ、アオサ属、フクロノリと共に特徴が見られ (付録 B), かつ、空間方向の情報エントロピーに対して時間方向の情報エントロピーが比較的大きい種であった (図—3.6)。

空間方向と時間方向の情報エントロピーが最大情報エントロピーに一致、もしくはそれに近いアマモ、コアマモ及びアオサ属に着目すると、やはり、時空間的な出現パターンを見出す事は困難である (図—3.7a, b 及び c)。一方、空間方向の情報エントロピーが最大情報エントロピーと一致するフクロノリは、観測された期間において空間的に広い分布が見られた。しかし、時間方向の情報エントロピーは比較的小さく、8月から10月までは全く観測されず、11月も1地点のみでの

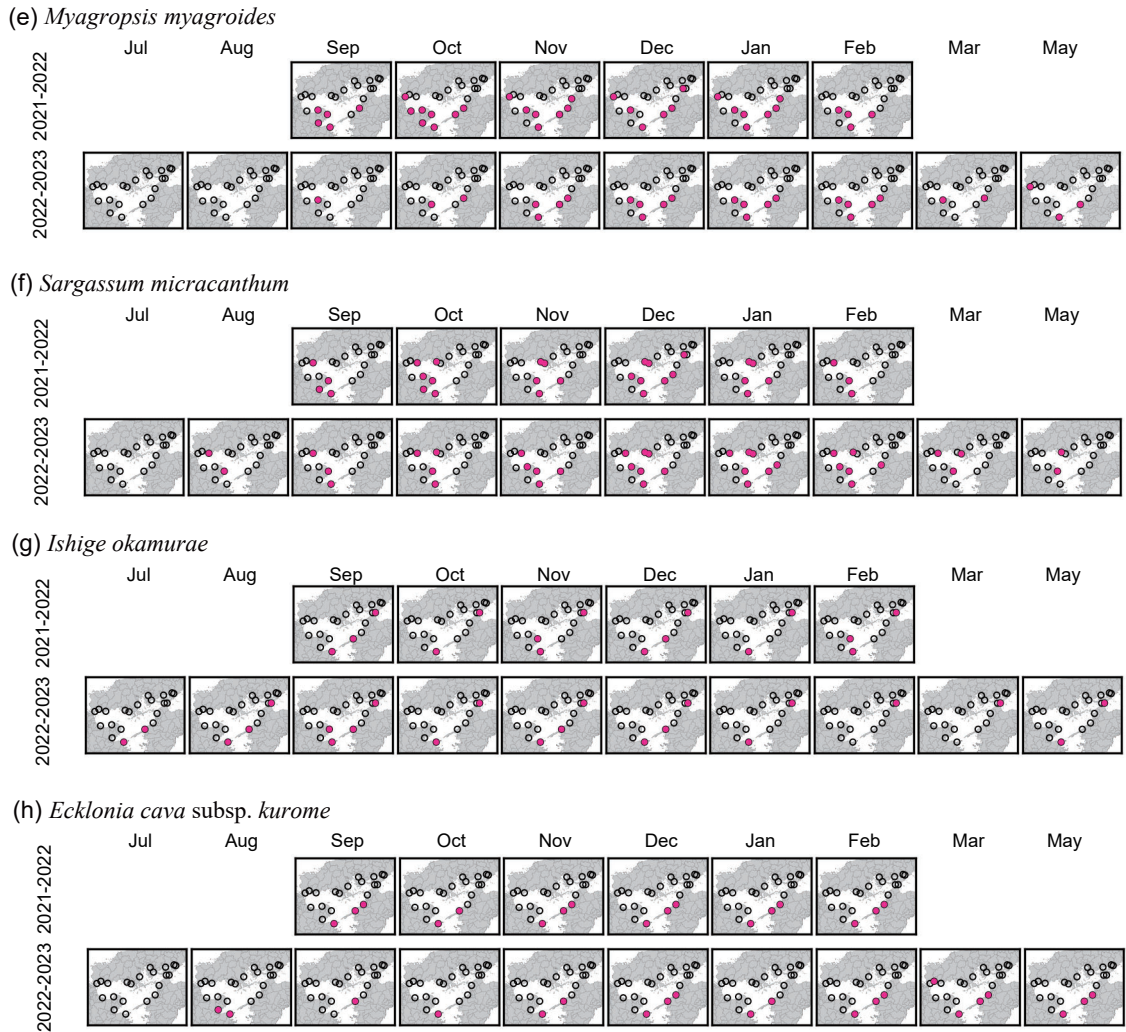
観測であった (図—3.7d)。

時間方向の情報エントロピーが比較的高かったものの、空間方向の情報エントロピーは高くなかったジョロモク、トゲモク、イシゲは、それぞれ、特定の地点のみで観測された (図—3.7e, f, g)。ジョロモクとイシゲは、本州側では観測されておらず、トゲモクは安芸灘や燧備後灘では観測されなかった。

クロメ (*Ecklonia cava* subsp. *kurome*) は、情報エントロピー時間方向で高く、空間方向では低い種であった。2022年8月における地点14と2023年3月における地点09を除き、地点15, 16及び17のみで高い頻度で出現する空間的に特異的な種であった (図—3.7h)。

(5) 既往文献との比較—空間分布—

海草・海藻に関して瀬戸内海周辺の報告をしている既往文献にはホンダワラ科に着目しているものが多い。その中でも、



図—3.7 つづき. (e) ジョロモク (*Myagropsis myagroides*), (f) トゲモク (*Sargassum micracanthum*), (g) イシゲ (*Ishige okamurae*), (h) クロメ (*Ecklonia cava* subsp. *kurome*) の結果.

アカモク (*Sargassum horneri*) は、瀬戸内海及びその周辺で広く分布する事が報告されており、漂着調査でも多く、かつ、広く観測された (図—3.8a). ジョロモクも既往文献で多く報告され、漂着海藻・海藻でもよく観測された種であるが、いずれのデータでも広島湾から下関までの本州側で観測されていない点に特徴がある (図—3.8b). トゲモクは、外洋の海域で観測され、瀬戸内海の周防灘及び伊予灘でも観測されているが、燧備後灘や安芸灘での観測が少ない点が既往文献と漂着海藻・海藻との間で一致している (図—3.8c).

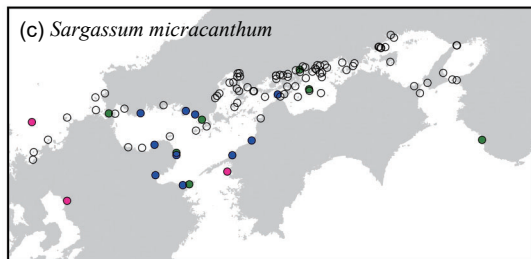
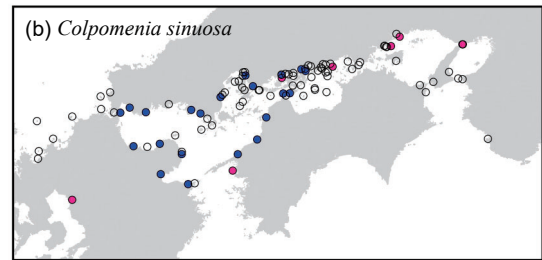
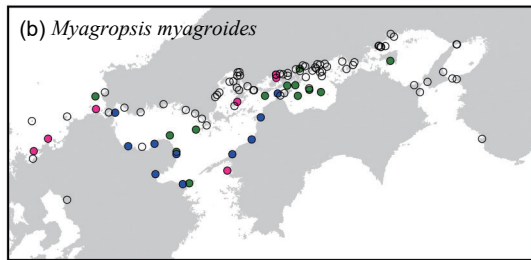
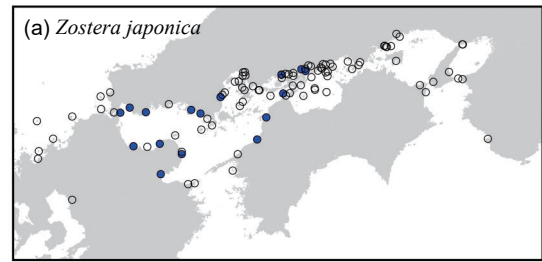
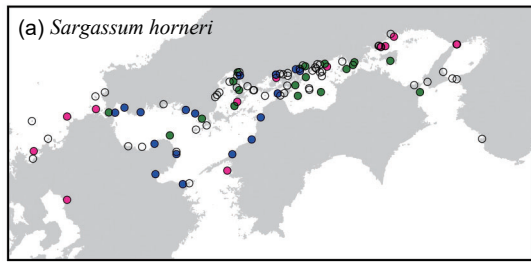
アマモは、アカモクほど既往文献の種特異的な調査の対象になっておらず、漂着海藻・海藻調査により、既往文献から得られる知見を更新できたと言える (図—3.8d). アマモは空間的に広く分布しているが、既往文献でも漂着海藻・海藻の調査でも、燧備後灘で観測結果が無い点が共通している.

クロメは、漂着海藻・海藻による周防灘の1地点と既往文献による播磨灘の1地点を除けば、瀬戸内海では伊予灘から安芸灘のみに分布しており、既往文献による空間分布とよく一致している (図—3.8e). なお、漂着海藻・海藻調査によって周防灘の1地点で観測されたのは1度だけである (図—3.7h).

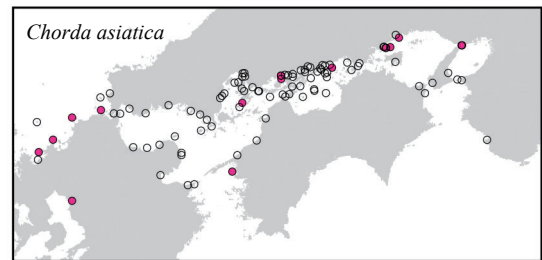
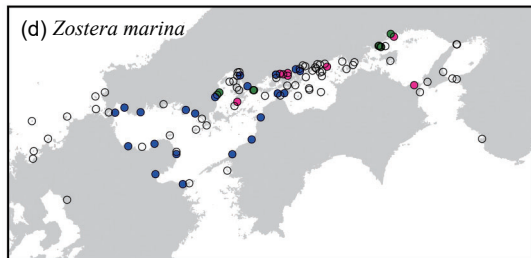
コアマモは既往文献では報告がなく、フクロノリも空間的にはわずかに報告されている程度であるが、いずれも漂着海藻・海藻調査では、調査対象領域で広く観測された (図—3.9). 一方、既往文献では報告があるツルモ (*Chorda asiatica*) は、漂着海藻・海藻調査では観測されていない (図—3.10).

(6) 既往文献との比較—季節性—

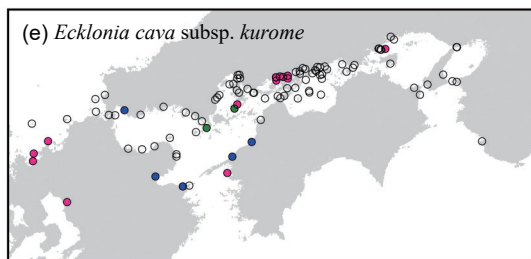
漂着海藻・海藻調査において季節的に高い頻度で観測された種は、長い漂流期間を経て漂着した結果の可能性が



図—3.9 漂着海草・海藻の観測結果と既往文献の報告との空間分布比較。漂着海草・海藻では観測されたが、既往文献では報告が無いもしくはあまり無いコアマモ (*Zostera japonica*) とフクロノリ (*Colpomenia sinuosa*) における比較。色の説明は図—3.8 のとおり。



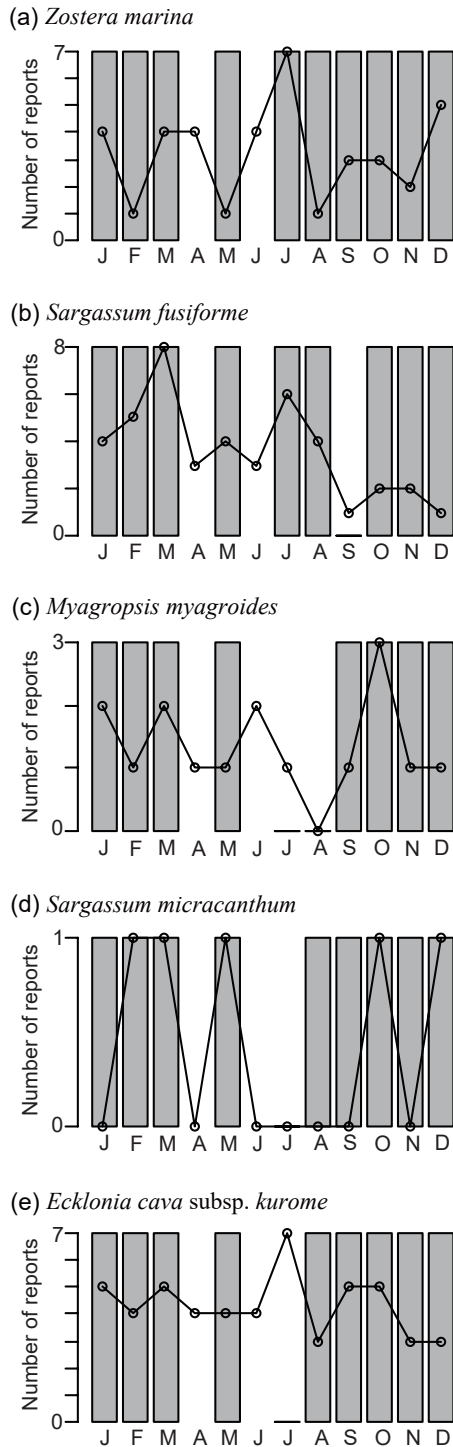
図—3.10 漂着海草・海藻の観測結果と既往文献の報告との空間分布比較。既往文献では報告があるが、漂着海草・海藻では観測されなかったソルモ (*Chorda asiatica*)。色の説明は図—3.8 のとおり。



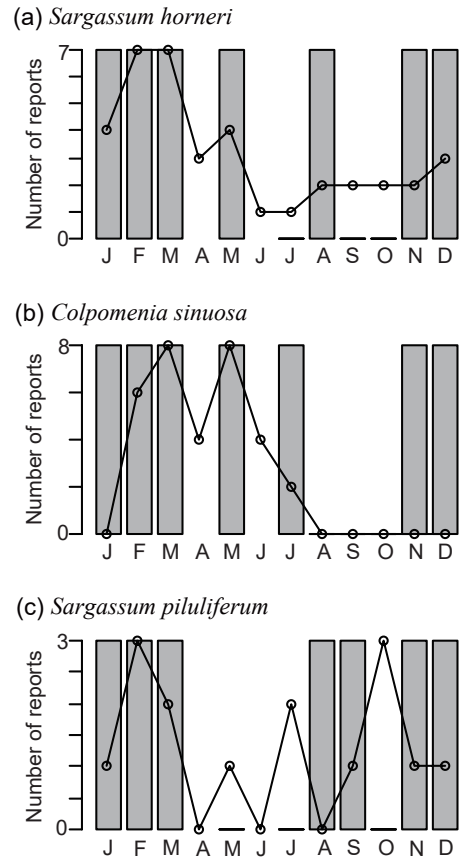
図—3.8 漂着海草・海藻の観測結果と既往文献の報告との空間分布の比較。観測結果と報告のいずれにおいてもデータが豊富なアカモク (*Sargassum horneri*)、ジョロモク (*Myagropsis myagroides*)、トゲモク (*Sargassum micracanthum*)、アマモ (*Zostera marina*)、クロメ (*Ecklonia cava* subsp. *kurome*) における比較。漂着海草・海藻の結果は青色で示し、マゼンタと緑色は、それぞれ、既往文献のうち、網羅的な調査による観測結果と特定の種を対象とした観測結果を示している。

る。図—3.11 に示す 5 種は、既往文献でも漂着海草・海藻調査でも、比較的いつでも観測された種である。ヒジキ (*Sargassum fusiforme*) とジョロモク (*Myagropsis myagroides*) の既往文献による報告数は、それぞれ、9月で 1 件のみ (図—3.11b) と 8月で 0 件であり (図—3.11c)、他の月に比べると少なかった。漂着海草・海藻調査でもそれぞれの月では観測されていない点は季節的な類似性がある。しかし、年間と通した既往文献による報告数と漂着海草・海藻調査による観測の有無との間に明確な同調性は見られない。この事は、他の 3 種においても同様である。

一方、アカモク (*Sargassum horneri*) とフクロノリ (*Colpomenia sinuosa*) は、漂着海草・海藻調査と既往文献のいずれでも



図—3.11 漂着海草・海藻の観測結果と既往文献の報告との季節性の比較。漂着海草・海藻の調査において高い頻度で観測されたアマモ (*Zostera marina*)、ヒジキ (*Sargassum fusiforme*)、ジョロモク (*Myagropsis myagroides*)、トゲモク (*Sargassum micracanthum*)、クロメ (*Ecklonia cava* subsp. *kurome*) 5種の比較。漂着海草・海藻が1地点でも観測された月はバーで示し(4月と6月の結果は無い)、既往文献については報告された文献数を示している。



図—3.12 漂着海草・海藻の観測結果と既往文献の報告との季節性の比較。漂着海草・海藻の調査及び既往文献ともに季節性が見られたアカモク (*Sargassum horneri*)、フクロノリ (*Colpomenia sinuosa*)、マメタワラ (*Sargassum piluliferum*) における比較。詳細の説明は図—3.11のとおり。

季節性が見られた種である(図—3.12)。フクロノリは、8月以降に既往文献で報告されておらず、漂着海草・海藻調査でも観測されていない。このように、生育期間が終る季節と漂着海草・海藻調査で観測されなくなる季節が一致しており、漂着海草・海藻が生育期間を反映できている可能性が示されている。逆に、漂着海草・海藻調査では、既往文献で報告が始まる2月よりも早い11月から観測されている事は、漂着海草・海藻調査がこれまでの手法よりも季節を先取りできている可能性を示している。

マメタワラ (*Sargassum piluliferum*) は、既往文献でも季節性が複雑であり、漂着海草・海藻調査でも季節性を読み取る事が難しい種である。

3.4 考察

漂着海草・海藻を対象とした調査手法は、瀬戸内海を広域に、かつ継続的に実施でき、かつ、種レベルの識別性で

海草・海藻を観測出来る手法であった。さらに、この手法により、種数に関して時空間的な分布が存在する事を見出す事が出来た。しかし、それぞれの種に着目すると、時間、空間、もしくはいずれの分布も完全に乱雑な状態であると見なせる種が存在し、漂着海草・海藻が生育分布を代表できるか疑問を残す結果が得られた。以下では、得られた結果を分析し、漂着海草・海藻による生育分布の代表可能性について考察した。

(1) 漂着海草・海藻の時空間的な乱雑さ

アマモ、コアマモ、アオサ属、ミル属、イシゲは、時間、空間、もしくはいずれも情報エントロピーが最大情報エントロピーに一致していた。これらの結果だけを見ると、漂流海草・海藻から生育分布を推定する事が難しいと判断される。しかし、例えば、瀬戸内海では、アマモやコアマモは多年生であり⁴⁸⁾、アオサ属も、一年を通して観測されることは知られている⁴⁹⁾。すなわち、これらは、そもそも、その生態として、時間方向の分布の情報エントロピーが高くなる種である。一方、ミル属、イシゲ等の生態については、生きもの好きの語る自然誌⁵⁰⁾などを参考にできるが、季節性についての明確な説明はなく、これらの時間方向のエントロピーの高さが、流れ藻になって漂い続けた結果である可能性はまだ残る。また、アマモ、アオサ属、アオリ属、フクロノリ、ミルの空間方向の情報エントロピーの高さからも、流れ藻が調査範囲に広がった可能性はまだ残る。

しかし、視点を種から種数に移すと、種数の時空間的な分布が見られた結果は、漂着海草・海藻の組成に時空間的なパターンが存在した事を示している。また、個別の種に戻って見ても、時空間的な分布パターンが確認できた種がいる事から、やはり、漂着海草・海藻は、必ずしも乱雑状態になるものではないと解釈される。

(2) 漂着海草・海藻は生育分布を代表できているか？

ジョロモク、トゲモク、クロメは、空間分布に特徴があり、かつ、既往文献と漂着海草・海藻調査との間で一致が見られた。アカモクとフクロノリは、既往文献と漂着海草・海藻調査との間で季節性に同調が見られた種である。以下では、それぞれの中からクロメとフクロノリに着目して、漂着海草・海藻による生育の空間分布と季節性の代表性の有無の議論を進める。

瀬戸内海のクロメは、中央部から西部の海域に分布することは既に知られており⁵¹⁾、漂着データの空間分布はそれに概ね一致していた(図—3.8e)。ただし、クロメは、既往文献では分布が報告されていない周防灘の奥で観測され、漂着データの空間代表性に疑問を残す結果が得られた。

クロメの分布域は、近年、遷移している可能性も指摘されているが²³⁾、その分布に関する確かな情報はなく、この結果の解釈は難しい。しかしながら、その観測は1回のみであ

り、全観測数からするとわずかな事象であった。瀬戸内海の流れ藻は、わずかな確率であるものの、遠くに輸送される事は数値シミュレーションでも裏付けられており^{37),38)}、この周防灘における観測は稀な事象を捉えた可能性がある。つまり、このクロメの事例は、漂着の有無だけで漂着物に空間的な代表性があると確定する事は難しいものの、漂着物の多くは近くから漂流してきたものであり、他の場所から漂流してくるものは稀である、という確率的な観点に基づけば、漂着データに空間的な代表性があると判断できる。漂着物から漂流元が近くにあるであろう事は、既に2.4で予想していたが、このクロメの観測頻度の空間分布は、その予想を改めて裏付けたものと言っていい。クロメの他にも、ジョロモク(図—3.8b)とトゲモク(図—3.8c)でも既往文献と漂着データとの間での空間分布の一致が見られる事は、漂着データの空間的な代表性を支持している。

フクロノリが漂着データで観測されていなかった8月から10月までの間は、既往文献でも観測されていなかった(図—3.12b)。既往文献で観測されなくなっているにも係わらず漂着物が未だに観測されているようであれば、漂着データの時間分布の代表性を疑う必要があるが、この観測されなくなった月の一致は、その懸念を払拭している。一方、漂着データが既往文献よりも早い11月から観測され始めて既往文献を先取りした点は、むしろ、漂着調査の優位な点と言えるかもしれない。フクロノリだけでなく、アカモクでも既往文献と漂着データとの間で季節性の一致が見られており(図—3.12a)、この結果は漂着データの時間的な代表性を支持している。

流れ藻となった後の海草・海藻の動態は、おそらく、漂流期間が決まる過程²⁴⁾や漂流中の流れや風から受ける力によって決まる。クロメやフクロノリ、もしくはジョロモク、トゲモク、アカモクの流れ藻の動態が他の種に比べて特殊なものでなければ、他の種においても、漂着したものが生育分布の時空間的な代表性を持つと結論づけて問題ないであろう。

(3) 漂着海草・海藻調査の有用性

漂着海草・海藻の調査手法は、時空間方向を幅広くカバーでき、生育分布の代表性も有する事から、潜水調査よりもコストや労力の面で明らかに優位性があると言える。また、漂着海草・海藻調査により、既往文献で報告されているよりも多くの種を検出できた事も優位な点と言えるであろう。衛星画像の解析に対しては、種の識別性において明らかに優位である。

ただし、クロメで示したとおり、生育分布を反映しているかどうかの判断が困難なデータが含まれる事もある。このため、漂着データが得られたからといって、一律にその生育場所を結論付ける事は危険である。この懸念については、コストや労力の優位性を活かして多くのデータを集め、統計的手法を用いて存在を確率的に表現する事で払拭する事ができる。

その具体的な方法については、第4章で説明する。

(4) 漂着海藻・海藻調査の発展性

今回の調査では、時空間的にデータを充実させる事を1つの目的としたため、各地点における調査時の条件を揃える事はしなかった。このことは、結果として、得られるデータに時空間的なバイアスがかからなかったと考えていいであろう。

漂着データの空間代表性の議論のとおり、漂着物の有無は、その存在を確定するものではなく、確率的な確からしさを示すものである。漂着データに時空間的なバイアスが生じてしまうと、確率が示す意味の担保が取れなくなってしまうため、漂着データは時空間的にランダムに得られる事が重要となる。得られるデータに空間的なバイアスが生じるおそれがある例として、風の条件が毎回同じ場所で類似する事で、風上に生育していた海藻・海草が、本来なら生育していない場所で観測されてしまう事が挙げられる。他には潮汐等もランダム性を確保する上で重要な条件であると考えられ、これらの条件が調査回毎に異なるよう調査計画を立てられるとランダム性の確保に寄与できる。

逆に、漂着海藻・海藻データに基づいて種の豊富さの評価を目的とする場合、地点間や各回の条件を揃えたり、サンプリングエフォートを揃える必要がある。条件を揃えるためには、ゴミの漂流メカニズム等の知見⁵²⁾⁻⁵⁴⁾を活かしつつ、海藻・海藻が漂着するタイミングを考える事が重要となる。ただし、種の豊富さの評価においては、サンプリングエフォートが重要な要素であるが、潜水調査等のエフォートの概念が全く異なる手法の間でそれを揃える事は難しい。

以上の発展性は、いずれも調査に高い技術力を求める事から、漂着海藻・海藻調査のコストや労力の面での優位性を薄める事になる。コストや労力と求める技術力とのトレードオフの関係にある事を理解した上で、本調査の発展性を見極める必要がある。

(5) 漂着海藻・海藻調査で対象に出来る種

既往文献と漂着海藻・海藻調査との間で片方の方法でしか観測されなかった種の存在は(表—3.2)、それぞれの調査方法で検出可能な種にバイアスがある可能性を示唆している。例えば、物理的な特性等によって海岸に漂着しにくければ、潜水等では観測されたとしても、漂着調査では観測されにくいし、その逆の特性を有した種も考えられる。このことから、潜水調査と漂着海藻・海藻調査との間での種の豊富さの比較には慎重になるべきである。また、このバイアスの可能性は、漂着海藻・海藻調査の手法が機能する種と機能しない種がある事を示唆している。漂着海藻・海藻調査を応用できる対象種を明らかにしていく事は今後の課題である。

3.5 まとめ

漂着海藻・海藻調査は、比較的容易に海藻・海藻の季節

性及び空間分布を捉える事ができた。また、漂着海藻・海藻調査ではエラーと思われるデータも取得してしまうが、これは稀に生じる事象であり、漂着海藻・海藻調査には空間的な代表性があると判断できる。さらに、海藻相の調査の空白域である伊予灘でデータを積み重ねる事が出来た点は、本調査が他の方法を補完する有用な手法である事を明確に示している。

漂着データに基づいて種の分布の可能性を確率的に表現できれば、たとえ、そこにエラーが含まれていたとしても実務上の有用性を高める事が出来る。次章では、漂着データを活用した種の空間分布の確率の推定方法について検討した。

4. 漂着データを活用した出現確率の推定

4.1 はじめに

漂着海藻・海藻調査により、確率的には生育分布を代表できる有用なデータが得られる事が明らかとなった。この調査結果から、海藻・海藻の存在を出現確率として数値化できれば、藻場の保全・再生・創出のための対象種の選択が容易になる事が期待される。本章では、漂着データを活用した海藻・海藻の出現確率の推定手法を示す事を目的として、まず、漂着データの活用に適した解析手法の選択について検討した。次に、誰でも利用可能な統計解析ツールであるMaxentに着目し、その利点と課題を整理した。

出現確率を求める統計解析手法としては、線形モデルが上げられる。線形モデルでは、古典的な方法の1つであり、海藻・海藻の有無(在・不在データ)を目的変数として入力して出現確率を推定する事が出来る。誤差に合理的な分布を用いて最尤推定法を用いた手法は一般化線形モデルと呼ばれる。線形モデルでは、当然ながら、在データが重要であるが、不在データも同等な重要性を有する。しかし、生物の調査においては、実際に存在しても不在として記録される事はよくある。これは偽不在と呼ばれ、偽不在は、調査期間中だけ不在であったり、調査期間中に存在するものの、希少種や隠蔽種である事による観測者の見落としによって生じる。

偽不在データが多く得られる事はゼロ・インフレーションと呼ばれ、出現確率の推定に影響する事が知られている⁵⁵⁾。ゼロ・インフレーションの影響を回避する手法に関する研究は、2000年代頃に活発に行われており、一般化線形モデルのような解析手法の枠組みの中でその影響を排除する工夫⁵⁵⁾や、在データだけを取り扱う解析手法⁵⁶⁾が提案されている。

Maxentは、在データのみから出現確率を推定する方法の1つであり^{57),58)}、ゼロ・インフレーションの影響を回避できる手法と言える。もし、漂着海藻・海藻調査がゼロ・インフレーションを起こしやすい調査手法であるならば、Maxentは相性

表—4.1 線形モデルと Maxent のメリットとデメリットの比較例.

モデル	メリット	デメリット
線形モデル	- 目的変数に対する説明変数の効果がシンプルな線形関係でモデル化されているため、応答を理解しやすい. - パラメータがコントロールされた実験や環境条件に偏りのない調査デザインの下で得られた在・不在データに基づいて解析すると因果関係の説明も可能な結果が得られる.	データがゼロ・インフレーションになっている場合、解析モデルを工夫するか、事前にデータのクリーニングが必要.
Maxent	在データを取ればよく、ゼロ・インフレーションの影響を考えなくていい.	- 結果の解釈が難しい場合がある. - バックグラウンドに空間的な偏りがあると、偏った結果を出す (本研究).

のいい方法である. Maxent の採用を前提とするならば、ゼロ・インフレーションを減らす努力をする必要がなく、漂着海草・海藻調査のメリットである簡易さがさらに際立つ. そうすると、高度な技術を要求する事が難しい市民参加型の調査手法としても採用しやすくなり、漂着海草・海藻調査の実用性をさらに高める事ができる.

Maxent のもう1つの特徴は、機械学習に基づいた解析手法を採用している点である. 機械学習に基づいたモデルは、線形性等の仮定を置かないことから、線形モデルよりも複雑な表現を実現でき、かつ、高い予測性能を有する. しかし、一方で、その複雑さは、我々の解釈を難しくさせる要因にもなる. この予測精度と解釈性のトレードオフは、一般論として、機械学習の特徴として知られている⁵⁹⁾.

ゼロ・インフレーションの懸念と予測精度と解釈性のトレードオフの観点から、線形モデルと Maxent の解析手法のメリットとデメリットを考えると、表—4.1 のとおり整理できる. 本章では、このメリットとデメリットに着目し、Maxent による利点と課題を整理して、漂着海草・海藻調査とのパッケージ化による実務への展開の可能性を議論した.

4.2 方法

(1) Maxent

Maxent の名称は、最大エントロピー (Maximum entropy) の原理に由来している. Maxent を扱った論文の著者によっては MaxEnt や MAXENT として記述しているものもあるが、本論文では原著の著者である Phillips らに従って Maxent とし記述する.

最大エントロピーとは、第 3 章でも説明したとおり、最も乱雑な状態 (一様な状態) の事であり、Maxent における最大エントロピーの原理に基づいたモデル化のアイデアとは、データの制約の中で最も一様な確率分布に近い分布を持つモデルを見つけ出す事である^{58),60)}. しかし、このフレーズだけでは理解する事は難しいため、以下では、Merow et al. (2013)⁶¹⁾

の解説を参考にして解説する.

Maxent における最も基礎となるモデル化は、個体数や出現回数の環境への応答を $\exp(\mathbf{z}(x_i)^T \mathbf{A})$ としているところにある. ここに、 x_i は解析セル i の地理的位置、 $\mathbf{z}(x_i)$ は x_i における環境変数のベクトル、 $\mathbf{A}$ は回帰係数のベクトルである. 目的変数がカウントの場合、このように負の値を取らない指数関数が採用される事が多い. これを x 方向に総和したものが解析対象とする空間内における個体数や出現回数の総数であり、 $\exp(\mathbf{z}(x_i)^T \mathbf{A})$ をその総数で割ったものが相対的な個体数もしくは想定の出現回数となる. Maxent では、この相対値を出現確率 $P^*(\mathbf{z}(x_i))$ として予測する.

この出現確率は、確率論でよく採用される考え方であり⁴⁶⁾、例えば、大型哺乳類の個体群管理に関心がある場合に、解析セル i に存在する個体数の割合を把握するために有効な確率である. しかし、各場所における海草・海藻の出現確率に関心を持つユーザーにとっては、対象空間内の総出現回数に興味はなく、総出現回数下での確率を示されたところで意味が分かりにくい. そこで、Maxent では、この確率を 0 から 1 までの広い範囲で感覚的に分かりやすい値に変換できるように工夫している⁶²⁾.

Maxent で推定する最も重要なパラメータは、回帰係数のベクトル $\mathbf{A}$ であり、その推定のために、候補となる $\mathbf{A}$ を当てはめたモデルの良さを評価する必要がある. その評価方法の1つが以下の相対エントロピーである:

$$\sum_{i=1}^N P^*(\mathbf{z}(x_i)) \times \ln \left(\frac{P^*(\mathbf{z}(x_i))}{Q(x_i)} \right). \quad (3)$$

これは、一般的にはカルバック・ライブラー情報量としても良く知られており、 $Q(x_i)$ に対する予測される出現確率の分布 $P^*(\mathbf{z}(x_i))$ の類似性を評価している. ここに、解析セルの数は N 個としている.

$Q(x_i)$ は、事前分布とも呼ばれ、これが $P^*(\mathbf{z}(x_i))$ を評価する基軸となる. この分布に理論解があったり、既に知られて

いる明らかな分布がある場合は、それを $Q(x_i)$ として採用する場合もある。しかし、裏付けされる分布がない場合、無情報な分布を採用する事が一般的にコンセンサスを得られる考え方である。すなわち、無情報な分布こそがエントロピーが最大となる分布であり、このような分布を採用する事が最大エントロピーの原理である。第3章でも示したとおり、地理空間上での一様分布 ($Q(x_i) = 1/N$) が最大エントロピーの1つのあり方であり、Maxent でもこれを採用している。Maxent では、 $Q(x_i)$ に地理空間上の一様分布を与えた上で、LASSO 回帰により Λ を推定している。環境変数には、線形だけでなく、二次関数、交互作用、ステップ関数、区分線形関数で変換したものを特徴量として考慮する事が出来る。

ここに、 $Q(x_i)$ は、地理空間上での一様分布であったとしても、環境空間上 ($Q(z)$) では一様とは限らない。また、この $Q(z)$ の分布は、解析対象とする空間の定義によって大きく変わる事もある。この空間や $Q(z)$ はバックグラウンドとも呼ばれ、解析結果や応答曲線 P^*/Q に影響する⁶¹⁾。実際、本研究でもバックグラウンドとする範囲の与え方によって、解析結果は影響を受ける(付録C)。本研究におけるバックグラウンドの設定については、本節の(4)解析の戦略で説明する。なお、Maxent の解説をした和文としては、坂口(2023)⁶³⁾も参考にできる。

(2) 解析対象種

アマモ場は、これまでも多くの造成の事例があることから、分布域を推定する技術が開発されてきた海草である⁶⁴⁾。海藻では、アカモクが多くの既往文献で調査対象となっており、かつ、瀬戸内海で広く分布する種である。アマモとアカモクは、既往文献でも情報が多く、漂着データも多く取れたことから、Maxent による考察の材料になることから、解析対象種として選定した。フクロノリは、既往文献による報告数に対して多くの漂着データが得られた種であり、漂着データによる更新の影響を確認しやすいことから、解析対象種として選定した。

クロメは、既往文献と漂着データの両方とも比較的充実しており、さらに、瀬戸内海の中の分布域が特徴的である。また、漂着海藻・海藻調査ではこれまで観測されていない場所での観測も記録され、漂着データにエラーが含まれている事が懸念された(第3章)。本章では、Maxent がこの特徴的な分布をどのように反映し、漂着データの不確かな記録が推定結果に与える影響を考察するため、クロメを解析対象種として選定した。

なお、これらの種の漂着データは、UMI-POCHI に収録されている最新バージョン v1.0.0 を用いた。このデータは、第3章で解析したデータから更新されている。

(3) 環境変数

環境変数は、海藻の分布の説明によく使われる水温¹⁸⁾とアマモ場の成立に強く関係していると考えられている波浪による底面せん断応力⁶⁴⁾の2つを考慮した。

瀬戸内海の水温は、第2章で説明したとおり、平均だけでなく、時間方向の分布が灘によって異なる変数である。本研究では、MODIS による表層水温を使って18年間の水温分布を変数として取り入れた。しかし、この分布を瀬戸内海のすべての点に取り入れると膨大なデータ量になる。また、海草・海藻が分布する海岸付近では、空間解像度は1 km 程度のMODIS による表層水温の推定精度は低い。これらの理由から、水温の分布は、第2章の検討に用いた22点の検査点を中心とした範囲の中で同じ分布になる事を仮定した。ただし、範囲の区切りについては、島の配置によっては単純な地理的距離だけでは合理的な範囲設定ができない場所もあるため、目視により図—4.1 のとおりとした。環境変数として水温の分布を取り入れる工夫として、平均水温、最低水温、最大水温を考慮した。18年間の最低水温と最大水温を採用すると外れ値を考慮してしまう可能性があるため、この可能性を排除する目的として、それぞれには分布の5%値と95%値を採用した。

波による底面せん断応力については、第三世代波浪モデルの1つであるWAVEWATCH-III v3.14 (WW3)⁶⁵⁾を用いた過去の再現計算から求めた。再現計算は、日本全域を含む広域から4段階のネスティングにより、瀬戸内海周辺を1/96°格子に区切り、1時間間隔で実施した。再現計算の期間は、2001年7月から2021年6月までの20年間とした。この期間は、水温の評価期間とは一致していないが、今回は統計値の算出を目的としているため問題はない。底面せん断応力 (τ_b , Pa) は以下の式で求めた：

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2 \quad , \quad (4)$$

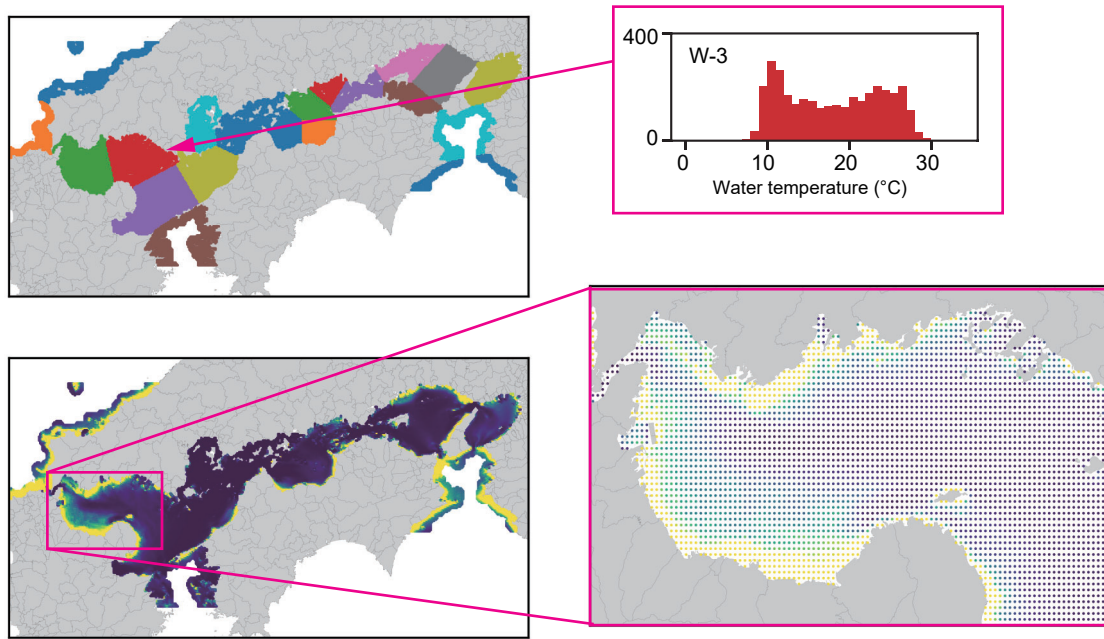
ここに、 ρ は水の単位体積重量 (kg m^{-3})、 u_b は WW3 から出力される底面における波浪の軌道流速 (m s^{-1}) である。 f_w は波による抵抗係数であり、Soulsby (1997)⁶⁶⁾により次式で求める事ができる：

$$f_w = 1.39(A/z_0)^{-0.52} \quad . \quad (5)$$

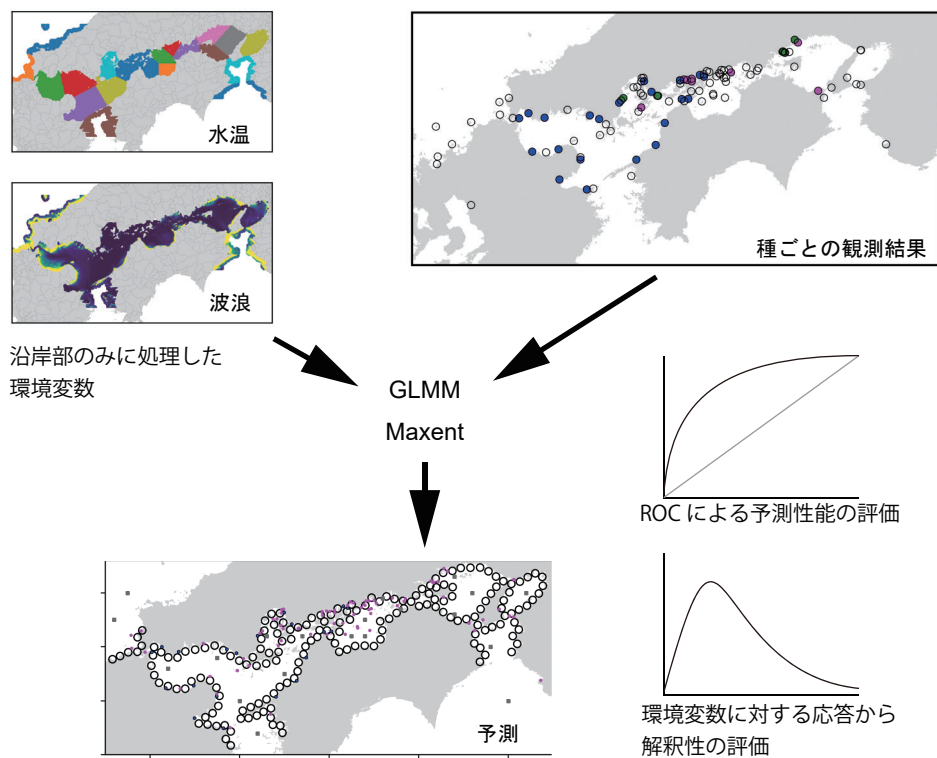
A は底面における波浪の軌道距離であり、WW3 から出力される値を用いた。 z_0 は海底の粗度高さであり、 0.7×10^{-3} (m) とした。モデルに入力する環境変数としては、最大となる底面せん断応力 (τ_{bm}) を考慮した。ただし、期間中の最大値は、特殊なケースを評価する事になることから、期間中の95%値を最大底面せん断応力として評価し、パッチの中でのその最大値。瀬戸内海周辺における最大底面せん断応力の再現結果は図—4.1 に示すとおりである。

(4) 解析の戦略

本研究では、海草・海藻の生育のポテンシャルの空間分布を目的としているため、季節性は考慮せずに在もしくは不在データを取り扱った。つまり、特定の季節における出現の



図—4.1 環境変数として考慮する水温と波浪による底面せん断応力。水温は、第2章の検討に用いた22点の検査点を中心とした範囲の中で同じ分布になる事を仮定している。ただし、島の配置によっては、単純な地理的距離だけでは合理的な範囲設定ができない場所もあるため、目視による判断により図のように区切った。波浪による底面せん断応力は、明るい色程強い事を示している。



図—4.2 海草・海藻の出現確率を推定するためのモデル化の手順。

しやすさだけでなく、季節的な出現のしやすさも含めた確率を推定している。このことから、水温及び波浪による底面せん断応力も季節性を考慮せず、それぞれ、18年間と20年間の統計値を環境変数としている。これらのデータを解析ツールに掛けて出現確率を推定した（図—4.2）。

Maxent による解析結果は、付録 C で検討したとおり、バックグラウンドの影響を受ける。推定だけが目的であればその影響は大きくないかもしれないが、解釈性を確保するのであれば、現実的な応答曲線を得る事も重要となる事から、バックグラウンドは慎重に設定する必要がある。付録 C の検討は、海草・海藻が本来分布しない深い場所をバックグラウンドとして取り込む事や漂着データが代表する空間スケールに対して環境変数の空間解像度が高すぎた事が応答曲線を非現実的なものにしたものと考えた。このことから、本研究では、バックグラウンドとなる評価点を半径 5 km の海岸線上の 177 のパッチとした（図—4.2）。環境変数は、このパッチの中で均質とし、水温分布はパッチ内の中での平均値、5% 値（最小値）、95% 値（最大値）を採用した。波浪による底面せん断応力については、パッチ内の最大値を採用した。

解析は、以下の4つの視点で実施した。まず、(1)Maxent から得られる結果について、古典的によく使われる線形モデルと比較した。モデル間の比較は、既往文献の網羅的な調査結果のみを対象として解析した場合とそこに漂着データを加えて解析した場合の2つのパターンで実施した。この比較により、解析手法の違い、もしくは得られたデータの違いが出現確率の推定結果に与える影響を考察した。この検討は、アマモを題材として実施した。

残りの3つの視点では Maxent のみに着目した。2つ目の視点は、(2) 漂着データを活用する事の効果であり、既往文献データに漂着データを加えることで、Maxent の解析結果がどう変わるのか検証した。この検証では、既往文献でも対象種となっているアカモク、既往文献に対して多くの漂着データを得られたフクロノリ、瀬戸内海の中での分布が特異的なクロメを対象とした。さらに、(3) 調査する海域に偏りがある場合の影響を検証するため、漂着データに空間的な偏りがあった場合を想定した解析を実施した。最後に、(4) 漂着データが解析結果を改善する効果について、漂着データの厚み（量）を変えて検証した。この検証では、空間的に特異的な分布を示したクロメを対象として実施した。これらの3つの視点では、既往文献データのうち、網羅的調査によって得られたデータだけでなく、特定の種を対象とした調査によって得られたデータも含めて解析した。

(5) ソフトウェア

Maxent には、Java で動く便利なバージョンが準備されている (https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)。しかし、入力するデータの事前検討等をせずに

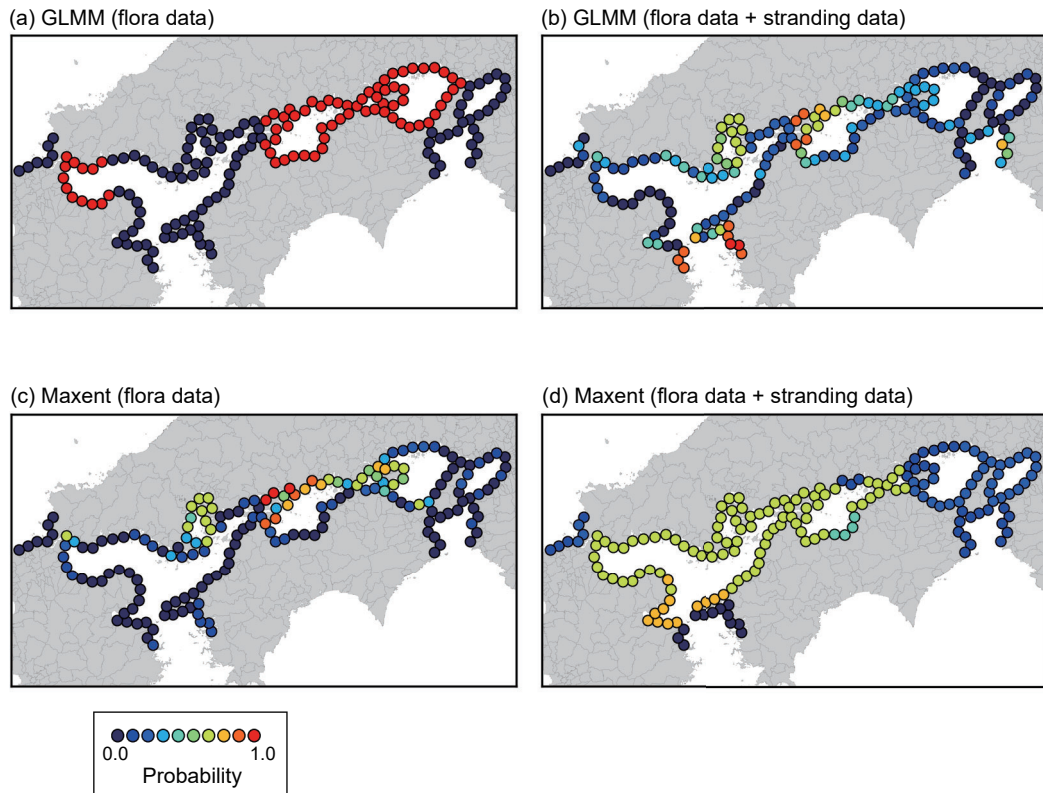
むやみに Java バージョンを使って解析を進めるのは危険である。そのため、本研究では、解析作業と同時に試行錯誤ができる統計解析言語 R⁴²⁾ で動作する maxnet パッケージ⁶⁷⁾ を用いた。UMI-POCHI の v1.0.0 では、既往文献と漂着データのいずれも在・不在データが収録されているが、は在データのみを maxnet に入力した。maxnet では事前に使う特徴量を設定する事も可能であるが、本研究ではサンプルサイズに依存した LASSO による自動的な選択方法 (default)⁶²⁾ を採用した。種の出現確率は、Maxent のデフォルトとなっている cloglog 変換⁶²⁾ を通して出力した値を採用した。

比較に使う線形モデルとして、ランダム効果を考慮できる一般化線形混合モデル (GLMM) を採用し、誤差として二項分布を仮定した。ランダム効果とは、二項分布のような拘束力の強い誤差を考えた場合に生じやすい過分散を緩和させるものである。考慮する説明変数以外の効果の影響が大きく、二項分布で許容できる誤差の範囲から外れたデータの解析に応用される。既往文献データ及び漂着データともにばらつきが大きいため、ここではランダム効果を考慮できる GLMM を採用した。GLMM の目的変数には、Maxent と同じデータであるものの不在データも含めたものを扱った。また、考慮する説明変数は Maxent に入力する環境変数と同じものとした。すべての説明変数の組み合わせの数だけ候補モデルを構築し、すべての候補モデルの中から、赤池情報量規準 (AIC) が最小となるベストモデルを Maxent と比較した。GLMM の解析には、R の glmml 関数⁶⁸⁾ を用いた。

(6) モデルの予測性能の評価と解釈

Maxent モデルの予測性能の評価には Receiver Operating Characteristic (ROC) 曲線を採用できる⁵⁸⁾。これは在・不在のような二値分類問題に使える評価指標であり、観測値と観測値と同じ環境条件下で予測した結果を比較して、その感度と特異度からモデルの予測性能を評価する方法である⁶⁹⁾。ROC 曲線をさらに数値化した Area Under the Curve (AUC) がその性能評価の指標となる。GLMM では、入力する在・不在データからこの評価ができるものの、在データのみを入力する Maxent では単純に評価を適用することが出来ない。そこで、Maxent ではバックグラウンドから擬似的に不在データを生成して評価を行う⁵⁸⁾。詳細の評価方法については、坂口 (2023)⁶³⁾ を参考にできる。本論文では、結果の記述とともに、この方法による評価の意味についても解説を加えて説明する。

Maxent と GLMM は、いずれも確率を予測するモデルであり、いずれの出現確率も季節方向も含めた観測のされ易さを意味し、正しい解析結果が得られていれば、その空間的な傾向は似たものになる。しかし、Maxent では解析対象空間内における総出現回数に対する出現回数の割合を予測しているのに対し（出力値はそこからさらに変換された値）、



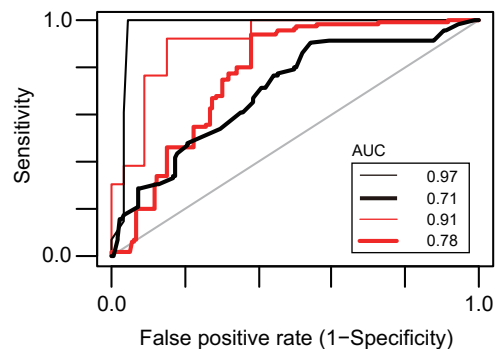
図—4.3 アマモの出現確率。(a) 既往文献の網羅的な調査結果 (flora data) に基づいた一般化線形混合モデル (GLMM), (b) 漂着データ (stranding data) を加えたデータセットに基づいた GLMM, (c) 既往文献の網羅的な調査結果に基づいた Maxent 及び (d) 漂着データを加えたデータセットに基づいた Maxent によって推定された出現確率を示している。GLMM はベストモデルの結果を示している。

GLMM では、ある環境下で観測した時の出現確率を予測しており、これら2つの出現確率の意味は異なる。このことから、2つの手法の比較においては、この点に注意した。また、Maxent の変換後に得られる出現確率の意味については議論があることから⁶¹⁾、解析結果を踏まえて、その意味と利用性を考察した。

4.3 結果と考察

(1) 線形モデルとの比較

既往文献の網羅的な調査結果に基づいた GLMM は、アマモの出現確率が播磨灘、燧備後灘、及び周防灘の奥で 1.0 に達し (図—4.3a)、同調査結果に基づく Maxent は、播磨灘、燧備後灘、安芸灘、周防灘のそれぞれの一部で高くなる傾向を示した (図—4.3c)。これら調査結果では、解析方法の違いによる出現確率の大きさに差があるものの、空間的な出現確率の傾向には大きな差はない。一方、漂着データを加えた場合、2つの解析方法の間に出現確率の空間分布の傾向に大きな差がみられる。GLMM による出現確率は、豊後水道や紀伊水道で高く、瀬戸内海の中では燧備後灘及び安



図—4.4 アマモの出現確率の推定における ROC 曲線。細線と太線は、それぞれ、既往文献の網羅的な調査結果のみと漂着データを加えた場合、黒色と赤色は、それぞれ、一般化線形混合モデル (GLMM) と Maxent による ROC 曲線である。

芸灘の一部を除く海域で低いが (図—4.3b)、Maxent による出現確率は、瀬戸内海西側全域で高い (図—4.3d)。

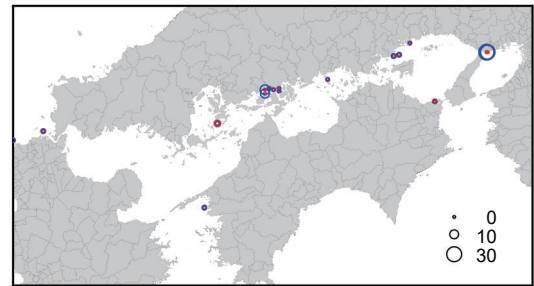
モデルの予測性能の評価に用いた ROC 曲線は、4つのすべての解析で 1 対 1 のラインより上側にある (図—4.4)。1

対1のラインは、モデルの予測性能がランダムな場合を示すものであり、これらのすべてのモデルは、少なくとも適当な予測結果を出していない事が分かる。

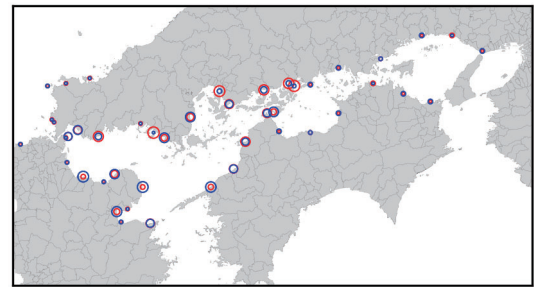
ROC 曲線に併記した AUC は、ROC 曲線の下側の面積であり、1.0 に近いほどモデルの予測性能が高いと判断できる。既往文献の網羅的な調査結果に基づく GLMM は、横軸に依らず感度 (Sensitivity) が 1.0 に近く、他の3つの解析よりも予測性能が高いと判断できる。また、解析手法に係わらず、既往文献の網羅的な調査結果に基づく解析の方が漂着データを加えた解析結果よりも予測性能が高い。

しかし、AUC の高さは、一概にモデルの良さを保証するものではない。AUC は、在・不在を再現しやすい程 1.0 に近づきやすく、在データと不在データが類似環境下で混在する程高くなりにくい評価指標である。すなわち、評価値はデータの構造に強く依存するものであり、異なるデータ間の比較可能性を保証するものではない。実際、既往文献の網羅的な調査結果と漂着データの構造を比較すると、既往文献の網羅的な調査結果は、一部の場所に不在データの数が多いのに対し、漂着データは、在データと不在データが空間的に混在している (図—4.5)。このことから、漂着データを加えた解析では AUC が高くなりにくい事は明らかである。よって、ここでの ROC 曲線を使った評価は、モデルの予測性能

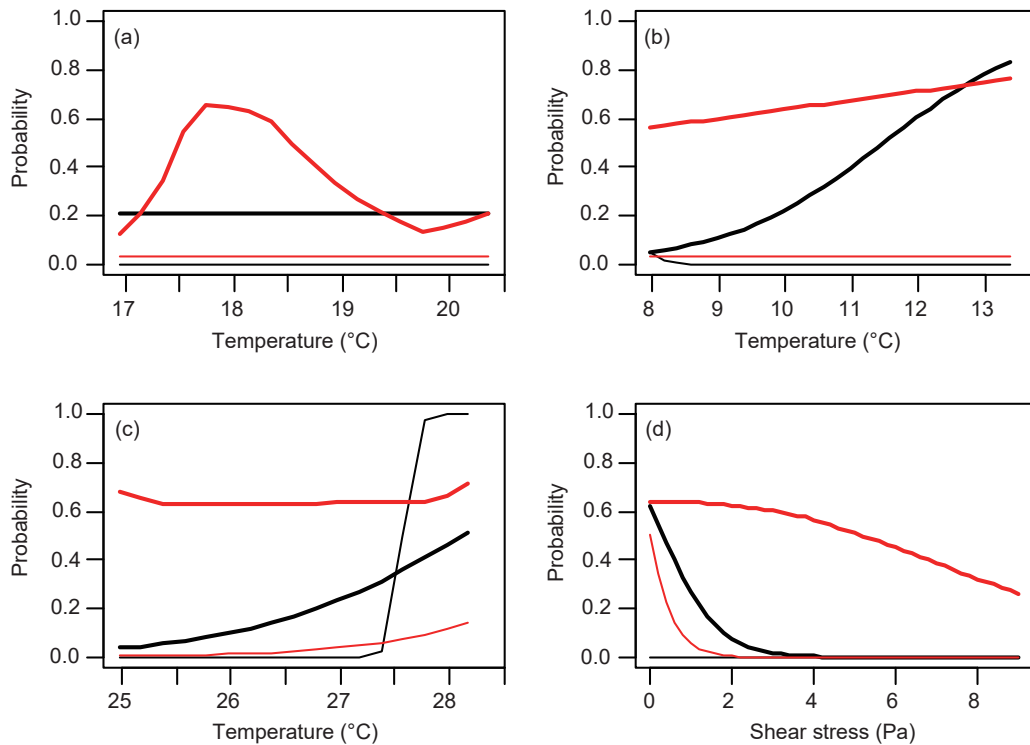
(a) flora data



(b) stranding data



図—4.5 アマモの解析に用いたデータの数。(a) 既往文献の網羅的な調査結果 (flora data) の数と (b) 漂着データ (stranding data) の数を示している。赤色と青色は、それぞれ、在データと不在データの数を示している。既往文献の網羅的な調査結果のうち、大阪湾内の在データは2つの円が重なっている。



図—4.6 環境変数に対するアマモの出現確率の応答。対象期間中の (a) 平均水温, (b) 最低水温, (c) 最高水温, (d) 最大底面せん断応力に対する出現確率の応答を示している。線の説明は、図—4.4 のとおりである。それぞれの出現確率は、他のすべての説明変数が平均値を取った場合の推定値を示している。

がランダムか否か、に留めるべきである。

モデルの良し悪しは、以下の比較で検証した。環境変数に対する出現確率の応答は、モデル間だけでなくデータ間でも大きく異なる（図—4.6）。既往文献の網羅的な調査結果に漂着データを加えた解析結果は、Maxent では平均水温に強い応答が見られているのに対し、GLMM では最低水温に強く応答している。しかし、このモデル間の違いは、アマモが出現しやすい水温の平均から最低までの範囲を反映しているものと解釈でき、矛盾はしていない。

一方、アマモ場の生育適地の上限は 28°C と言われているにも係わらず⁷⁰⁾、既往文献の網羅的な調査結果に基づいた GLMM では、出現確率は最高水温が 27.5°C 付近よりも高水温側で高い出現確率となっている。また、漂着データを加えた場合でも、GLMM の応答は既往の知見とは異なる傾向を示している。これらの結果から、いずれのデータセットでも、GLMM は妥当性に欠ける出現確率を推定しているように見える。

モデルの妥当性をさらに考察するため、図—4.5 において円のサイズが大きい（データ数が多い）地点に着目した。例えば、不在データが多かった大阪湾内の調査地点は（図—4.5a）、比較的水深が深く、また、基質が砂礫であることからアマモが生育できる場所ではない。つまり、この地点の不在データの多さは、明らかにゼロ・インフレーションを起こした結果である。また、漂着データに不在データが多く含まれている事も着目すべき点である（図—4.5b）。アマモの生産量には季節性がある事を考えると⁴⁸⁾、1年を通した漂着海草・海藻調査では、不在データが得られる季節があるのは当然である。この不在の季節性もゼロ・インフレーションが起こる要因として既に知られている事である⁵⁵⁾。

データに不在が記録されていたとしても、Maxent では在データしか扱わない事から、このようなゼロ・インフレーションの影響を受けない。一方、GLMM では、ランダム効果がこの影響をある程度考慮できるものの限界がある。GLMM の最高水温に対する応答曲線が妥当性に欠けていたのは、これらのゼロ・インフレーションの影響を強く受けたためであると考えられる。

データを事前にクリーニングしてから解析モデルへ入力したり、ゼロ・インフレーションに対応できる線形モデルを用いれば、この影響を避けられるかもしれない。しかし、そのような操作には高度な判断力が必要であり、操作方法によっては、解析者のバイアスがかかる恐れがある。その点、不在データを考慮しない Maxent では、ゼロ・インフレーションの影響を受けない事から、Maxent の方が線形モデルよりも誤ったハンドリングを起こしにくい方法と言える。

(2) アカモク、フクロノリ、クロメの Maxent

アカモクが空間的に広く分布した種である事は既に説明し

たとおりである（図—3.8a）。アカモクの既往文献には 65 のデータが記録されており、漂着データの数は 92 であった。既往文献のみを Maxent で解析した場合、出現確率が高い範囲は安芸灘から大阪湾までの範囲に限られるが（図—4.7a）、漂着データを加えた場合、その範囲は周防灘及び伊予灘にも拡大した（図—4.7b）。この出現確率が顕著に上昇した海域は、漂着海草・海藻調査を重点的に行った海域である。環境変数に対する応答も、漂着データを加えることで全体的に上昇している（図—4.7c）。

フクロノリは、既往文献に対して多くの漂着データが得られた種である（図—3.9b）。既往文献に含まれるデータと漂着データ数は、それぞれ、24 と 126 であった。フクロノリの出現確率が高い海域は、既往文献のみを Maxent で解析した場合では、燧備後灘の一部と播磨灘及び大阪湾のみに限定されていたが、漂着データを加える事で瀬戸内海全域に拡がり（図—4.8a 及び b）、漂着データを加えた効果はアカモクの場合と類似している。出現確率は平均水温に対して強く応答しており、出現確率が高くなる範囲は、平均水温の高水温側にシフトしている（図—4.8c）。

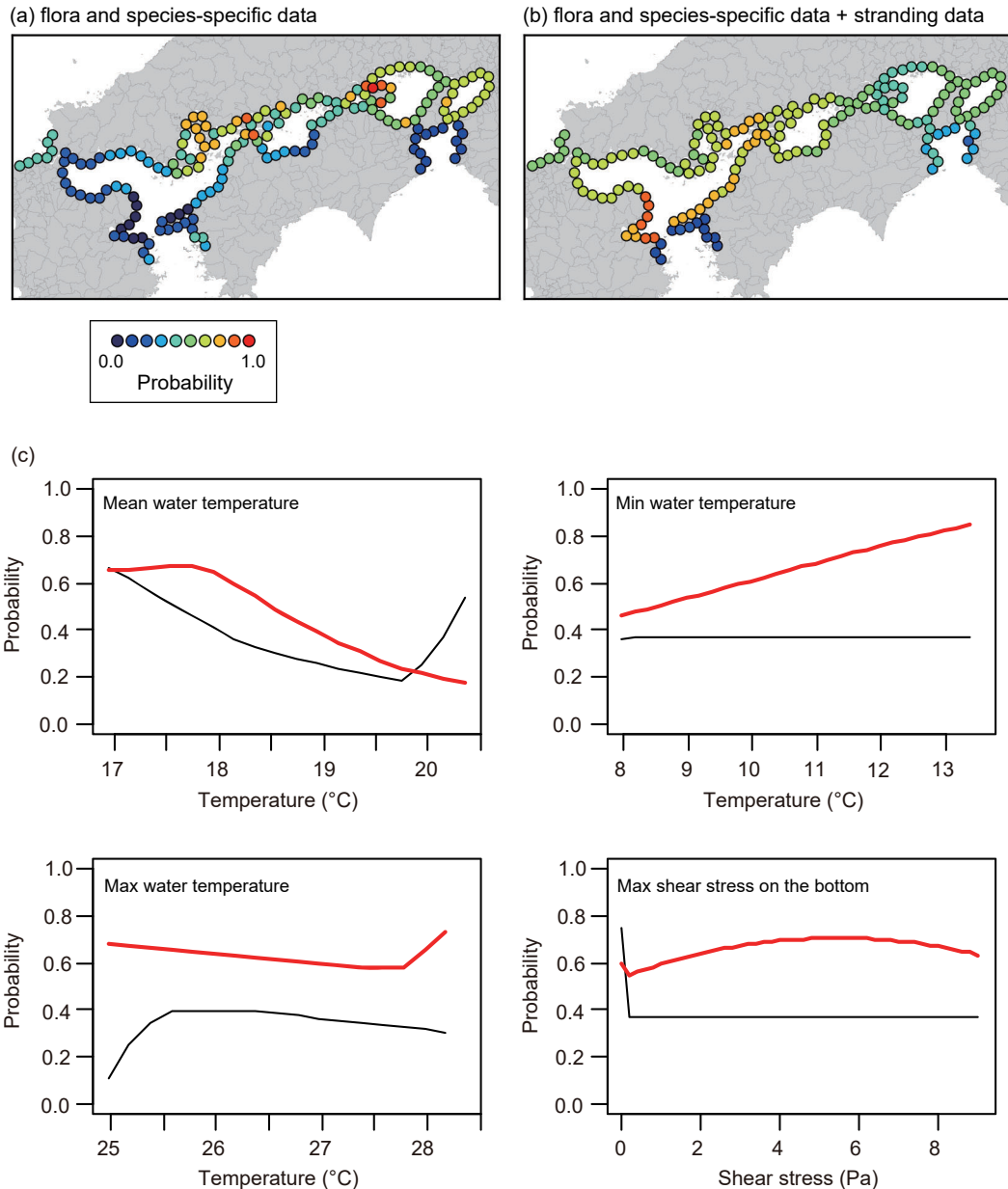
クロメは、安芸灘及び伊予灘に空間的に特異的に分布し、漂着データでもその特徴を捉えられたが、周防灘の 1 地点で 1 回観測された（図—3.8e）。既往文献と漂着データに含まれるデータ数は、それぞれ、46 と 42 であった。

クロメの出現確率が高い範囲は、既往文献のみの解析では安芸灘と燧備後灘の一部だけであったが（図—4.9a）、その範囲は漂着データを加える事で伊予灘に拡大した（図—4.9b）。しかし、周防灘の奥では出現確率は低いままであった。出現確率の応答は、平均水温と最低水温に対して顕著に変化した（図—4.9c）。出現確率が最低水温が 9°C から 10°C 付近で上昇している点は、馬場（2021）¹⁸⁾ によるクロメの水温範囲が 8°C までであること（図—2.3）と一致している。

(3) 波浪による底面せん断応力の影響

本研究で対象とした4種すべての解析で、出現確率の水温に対する強い応答が示されたが、アカモクとフクロノリにおいては、波浪による底面せん断応力に対してほとんど応答していなかった（図—4.7c 及び 4.8c）。また、アマモにおける波浪による底面せん断応力に対する応答は、一部のモデルで見られたものの、漂着データを加えた Maxent ではほとんど見られなかった（図—4.6d）。クロメの出現確率は、波浪による底面せん断応力が強くなるに従って緩やかに低下しているものの、0.0 に下げるような決定的なものではなかった（図—4.9c）。

アマモ場の成立条件は、波浪による底面せん断力と地下茎が張る底泥土粒子の応力との力学的バランスで説明され、このバランスの指標となるシールズ数がいくつか提示されている。このシールズ数を波浪による底面せん断力に換算した限

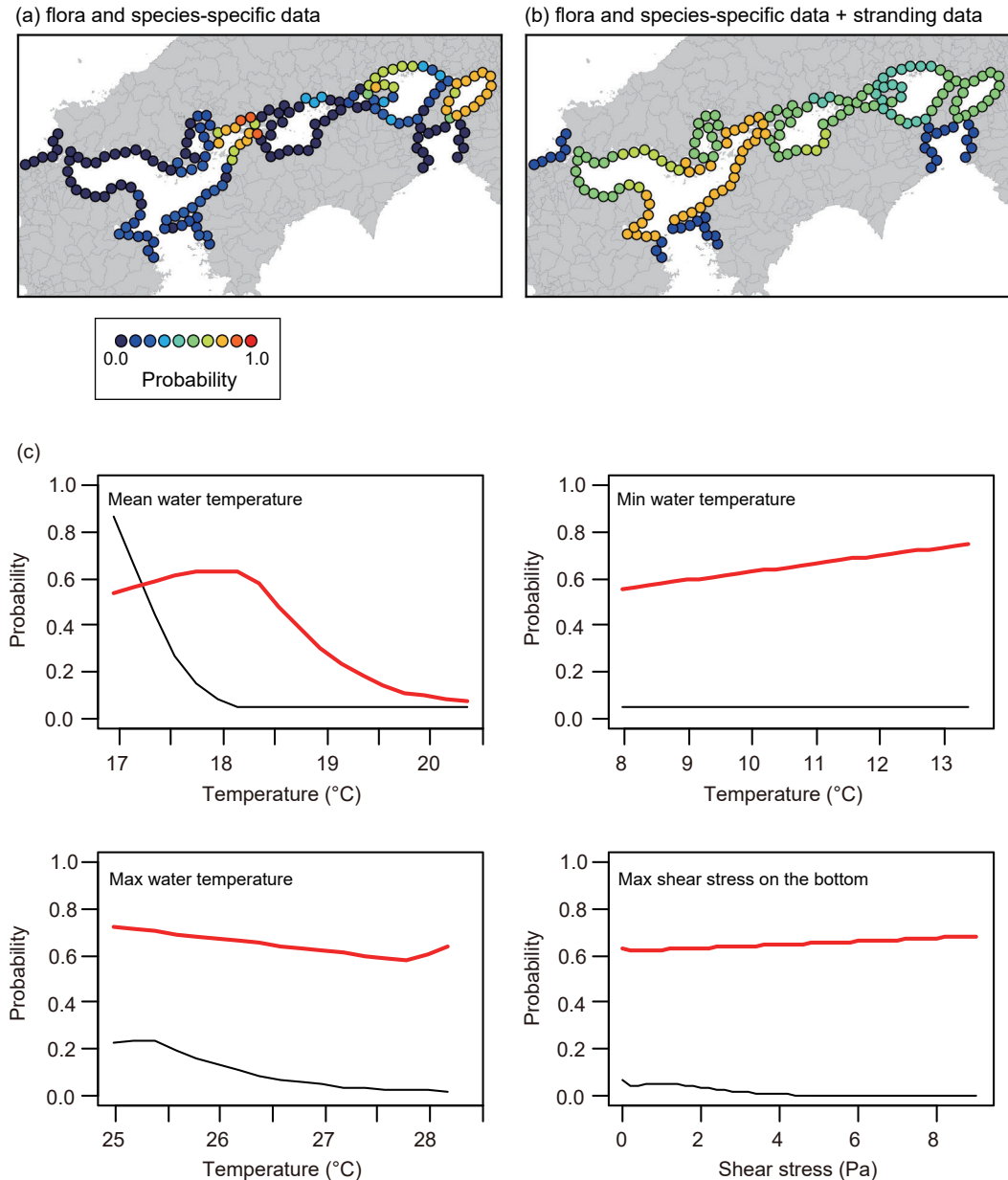


図—4.7 アカモクの出現確率。(a) 既往文献 (flora and species-specific data) に基づいた Maxent (AUC = 0.81) と (b) 漂着データ (stranding data) を加えたデータセットに基づく Maxent (AUC = 0.70) によって推定された出現確率、及び (c) それぞれの解析における環境変数に対する出現確率の応答を示している。黒線と赤線は、それぞれ、既往文献に基づいて推定された応答と漂着データを加えたデータセットに基づいて推定された応答を示している。既往文献と漂着データの数、それぞれ、65 と 92 である。いずれも在データの数である。

界値は 0.64 から 4.0 Pa となる⁶⁴⁾ (付録 C も参照できる)。この限界値を信じれば、アマモの波浪による底面せん断力に対する出現確率は、この値付近よりも高い範囲で 0.0 に近づく事が期待されたが、Maxent による結果はそうではない (図—4.6d)。我々の文献調査では、他の海藻3種の生育を説明する波浪による底面せん断力に関する知見を探せていないものの、Maxent の結果が波浪による底面せん断力に対する現実の応答をうまく反映しているようには見えない。

この理由として、本研究では、波浪による底面せん断応力

として、空間的には半径 5 km のパッチ内の最大値を採用した事が挙げられる。しかし、パッチ内の海藻・海藻の空間分布はもっと局所的であったり、基盤との相互作用もある事から、この代表値では、波浪の影響をうまく表現できなかった可能性がある。また、時間的には 20 年の統計値を環境変数として取り込んだが、波浪による底面せん断応力が影響するメカニズムは、生活史のステージによって異なってくるものと考えられる。波浪による底面せん断応力の影響は、おそらく、このようなアプローチでは見出す事が難しい。



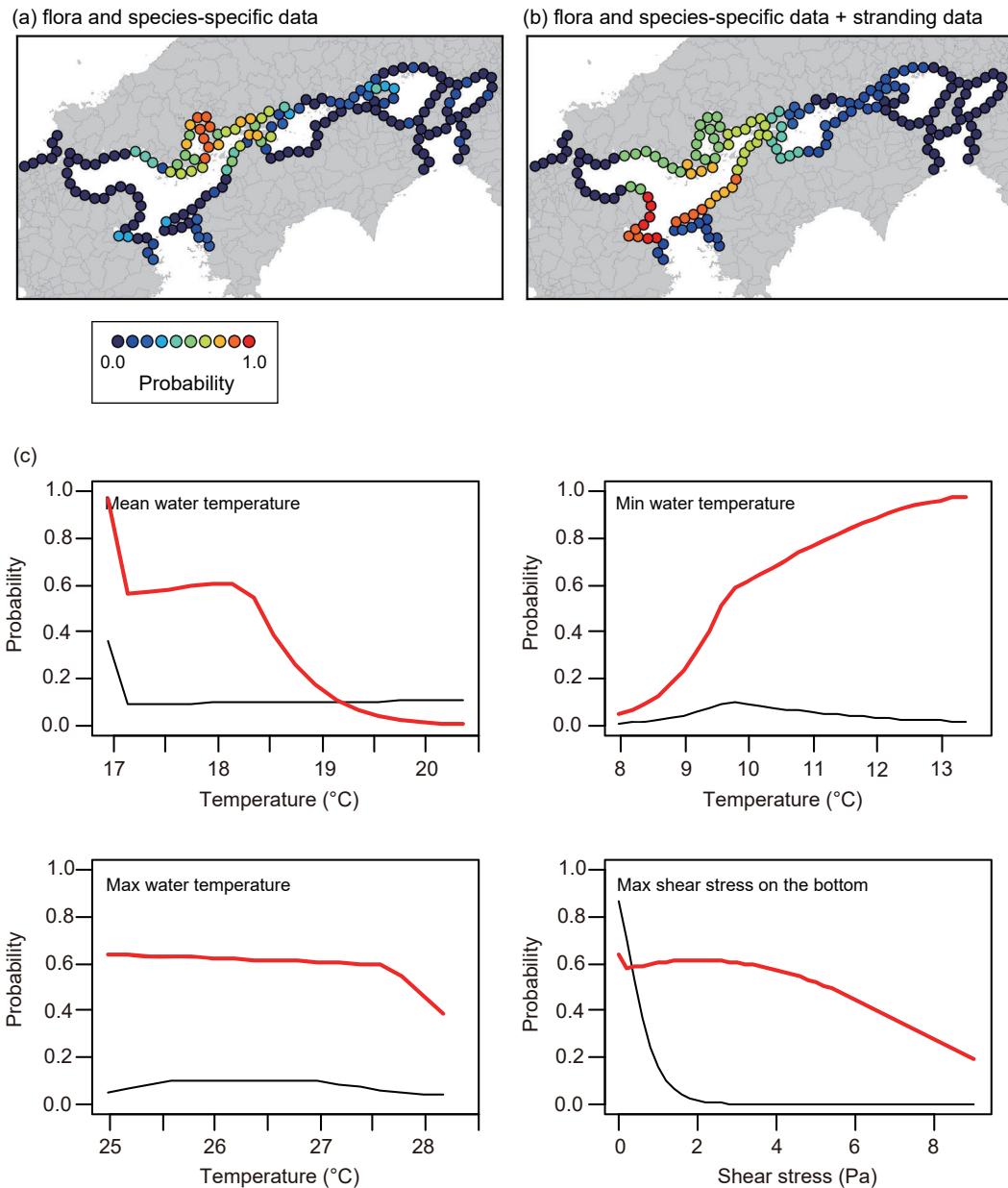
図—4.8 フクロノリの出現確率. (a) 既往文献 (flora and species-specific data) に基づいた Maxent と (b) 漂着データ (stranding data) を加えたデータセットに基づく Maxent の AUC は、それぞれ、0.94 及び 0.74 である。既往文献と漂着データの数値は、それぞれ、24 と 126 である。その他の図の詳細な説明は、図—4.7 のとおりである。

(4) 調査範囲の偏りの影響

本研究で解析した4種すべてにおいて、漂着データを追加する事で出現確率が高い範囲が広がった。これは、既往文献だけでは、アマモの生育範囲をカバー出来ていなかったためである。周防灘の奥だけでアマモの漂着データが得られたとするシミュレーションを行うと、やはり、出現確率の推定結果にも空間的に偏りが生じる (図—4.10)。この結果は、当然ではあるが、漂着海草・海藻の調査範囲を漂着が想定される範囲よりも狭く設定してしまうと、推定結果が空間的に偏

たものになる事を明確に示している。

クロメの空間分布は特異的であり、今回の漂着海草・海藻調査の範囲の中に収まっていた。しかし、アカモクとフクロノリは、漂着データを追加する事により出現確率が高い範囲が瀬戸内海全域に広がった。この漂着データを加えた事による出現確率の分布の変化の違いは、クロメの生育分布が漂着海草・海藻調査の範囲に収まっていたのに対し、アカモクとフクロノリは、漂着海草・海藻調査の範囲よりも広い範囲で分布している可能性を示している。つまり、アカモクとフクロノ



図—4.9 クロメの出現確率。(a) 既往文献 (flora and species-specific data) に基づいた Maxent と (b) 漂着データ (stranding data) を加えたデータセットに基づく Maxent の AUC は、それぞれ、0.93 及び 0.85 である。既往文献と漂着データの数は、それぞれ、46 と 42 である。その他の図の詳細な説明は、図—4.7 のとおりである。

りの出現確率の推定結果は、漂着海草・海藻調査の環境空間の範囲内で高止まった偏りを有している可能性がある。

Maxent では、任意の空間（パッチ）から得た在データを入力する事ができるが、それでもなお、通常の統計モデルで要求される空間からのランダムサンプリングは依然として必要である。Maxent で出現確率を推定する事を前提として、新たにデータを積み重ねる調査計画を立てる際には、対象空間からのランダムにサンプリングする事は重要なポイントである。

トである。

(5) データの厚み

クロメを対象として、漂着データの数を 0 から段階的に 42 まで増やすシミュレーションにより、漂着データの厚みが出現確率の推定結果に及ぼす影響を検証した (図—4.11a)。この結果から、既往文献データのみ（漂着データなし）でも出現確率が高いメッシュ（例えばパッチ番号 65）と漂着データを加えても出現確率が低いままのメッシュ（例えばパッチ番号

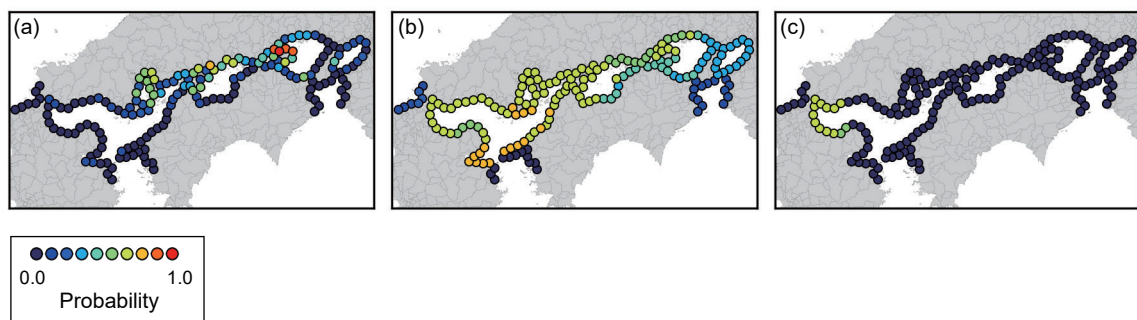
号 10) では、出現確率は、漂着データの厚みを増やす過程で変化していない。

クロメは、1 度だけこれまで分布域の報告がない周防灘で漂着しているのが確認され (図—3.8e)、漂着海草・海藻調査にはエラーが含まれる可能性が懸念された (3.5)。シミュレーションでは、1 つの漂着データにより出現確率がやや高くなるメッシュもあるが、その上昇は限定的であり (図—4.11b)、周防灘でも出現確率の上昇は見られていない (図—4.9a 及び b)。これらの結果から、漂着海草・海藻調査の結果にマイナーなエラーが含まれていたとしても、Maxent を使って出現確率として評価するのであれば、解釈にはほとんど影響しないと言える。

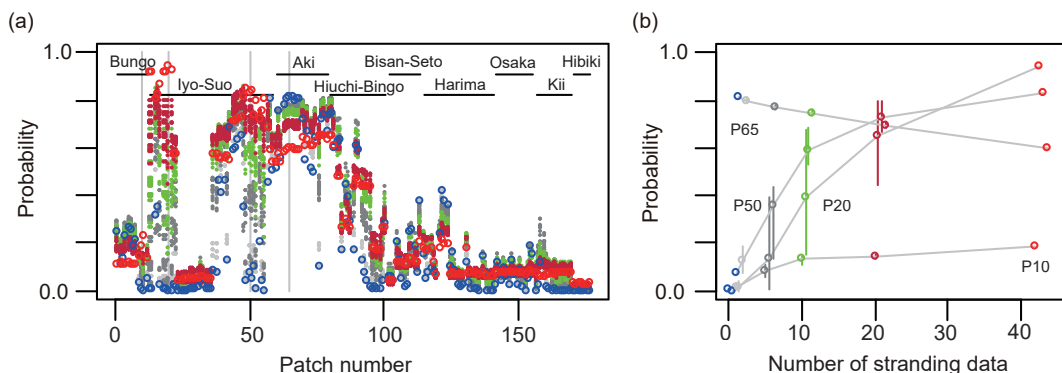
一方、漂着データの厚みを増やしていく過程で出現確率が高くなっているメッシュはいくつかあり (図—4.11b)、その上

昇傾向はメッシュによって異なっている。パッチ番号 20 と 50 における出現確率は、いずれも、漂着データを加えない場合に 0.0 に近く、42 のすべての漂着データを加えると 0.8 程度を超えている。また、いずれのパッチでも、漂着データを 20 に増やせば、概ね全 42 データを加えた場合に近い出現確率になっている。しかし、パッチ番号 50 では漂着データを 5 つだけ増やした場合に出現確率が 0.4 程度にまで改善しているが、パッチ番号 20 では漂着データを 10 に増やしたところでその半分程度以下にしか改善していない。

クロメの漂着データの空間分布は第 3 章に示したとおり、伊予灘の四国側と九州側に集中しており (図—3.7h)、漂着データの追加によって出現確率が改善された海域は伊予灘周辺である (図—4.9a 及び b)。パッチ番号 20 は、国東半島の北東側であり、漂着データが得られた実績はないものの、水



図—4.10 漂着データの空間的な偏りが解析結果に与える影響の検証。解析対象はアマモとし、(a) 既往文献のみに基づいた結果、(b) 全ての漂着データを加えた結果、(c) 解析に加える漂着データを周防灘の奥に限定した結果を示している。既往文献の数は 39 である。漂着データの総数は 196 であり、c のパネルは、そのうちの 21 データのみを周防灘の奥から抽出して解析した結果である。



図—4.11 漂着データの厚みが解析結果に与える効果の検証。クロメを対象としている。(a) 評価パッチに対する出現確率の推定結果と (b) 特定の評価パッチ (パッチ番号が P10, P20, P50, P65) における漂着データの厚みに対する推定される出現確率の変化。既往文献と漂着データの数は、それぞれ、46 と 42 である。既往文献データのみと全ての漂着データを加えた推定結果は、それぞれ、青丸と赤丸で示している。薄い灰色、濃い灰色、緑色、濃い赤色は、それぞれ、漂着データから 1, 5, 10, 20 個のデータをランダム抽出するシミュレーションによって出現確率を推定した結果である。特定の評価パッチに対するシミュレーションの結果は、平均 (丸)、最小値 (バーの下端) 及び最大値 (バーの上端) を示している。

温環境が伊予灘と類似していることから、漂着データの厚みを増す過程で、付随して徐々に出現確率が上がったパッチであると考えられる。

このように、直接データが得られていないにも係わらず、出現確率が改善された理由は伊予灘周辺の環境が類似していたためであると考えられる。このことは、環境が類似した場所では、調査地点の配置を疎にして、全体の調査コストを節約できる可能性を示している。

(6) Maxent が示す出現確率の意味

既に 4.2 で説明したとおり、在データのみを使って Maxent で推定される確率の意味は、在・不在データを使った線形モデルで推定される確率の意味とは異なる。また、Royle et al. (2012) は、この意味だけでなく、Maxent で採用されているモデルのあり方やモデル選択の方法として LASSO を採用している点についての指摘もしている⁷¹⁾。しかし、一方で、在データがランダムサンプリングによって得られたものであれば、他の数学的に正当なモデルと等価性がある事も既に示されている^{72),73)}。

在・不在データに基づいた確率の正当性が主張される裏には、データを得るためのサンプリングが正しく行われている事が前提となっている。しかし、実際には、海草や海藻の調査地点は、ランダムに選定したところでゼロ・インフレーションの問題が起きるので、予め、サンプルが得られそうな場所を選定する事が普通である。このようなサンプリングは、選好サンプリングと呼ばれ、選好サンプリングによって得られたデータから推定される確率は、既にバイアスが入った上での条件付きの確率となる事が知られている⁷⁴⁾。つまり、海草や海藻の在・不在データには既にバイアスが入っているものであり、これに基づいて正当な線形モデルから推定された出現確率は、結局、バイアスの問題を含んだ結果である。このため、Maxent から出力される出現確率と大差があるは言えない。

一方で、Royle et al. (2012) は、モデルの正当性とは別の角度からの議論として、Maxent による logistic 変換で出力される値の過小評価も指摘している。しかし、この点についても、Phillips et al. (2017)⁶²⁾ は、それまで根拠の薄かった logistic 変換から、個体数もしくは出現回数が多いほど、少なくとも 1 個体もしくは 1 度でも観測される確率が高くなる事を表した complementary log-log (cloglog) 変換をデフォルトの変換方法として採用している。この改良は、理論的な妥当性を強くすると同時に logistic 変換による過小評価の問題も改善している。

4.4 まとめ

本章では、Maxent は、海草・海藻の分布に関する既往文献と漂着データに基づいて、在データのみで出現確率を推定できる事を示した。さらに、Maxent の観点から漂着デー

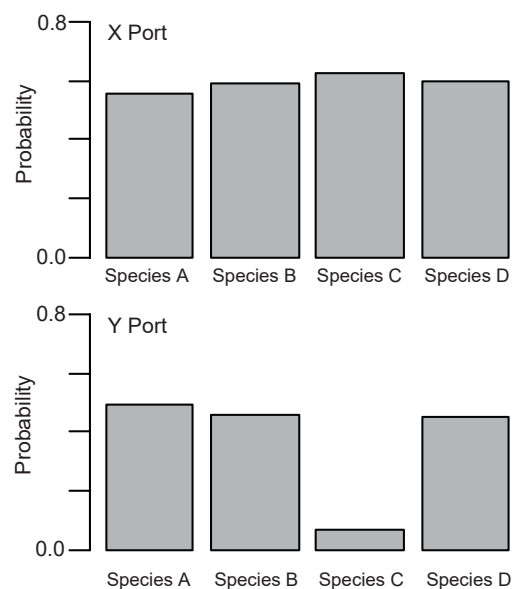
タの取得の方法についても考察した。まず、漂着データに空間的な偏りがあると推定結果も偏ってしまう事を明確に示した。次に、Maxent を用いて漂着データの厚みを増していく事で出現確率の推定値が高くなる事、漂着データにエラーが含まれているとしても、その数がわずかであれば推定結果にほとんど影響しない事を示した。

在データのみを扱って Maxent から出力される出現確率の意味には曖昧さが残る。しかし、選好サンプリングを避け難い海草や海藻においては、それによって得られた在・不在データから推定される出現確率にもバイアスが含まれる事は避けられない。よって両者の解析方法から推定される出現確率の意味の妥当性に大差があるは言えない。出現確率の厳密な意味よりも、漂着海草・海藻の調査手法の容易さのメリットから、Maxent は出現確率を推定する実用的な手法として選択肢になるであろう。

5. あとがき

5.1 結論

海草・海藻藻場の分布の現状把握の必要性に着目し、漂着した海草・海藻に着目した調査手法と種の出現確率の推定手法を提案した。この結果、漂着海草・海藻に基づく調査手法は、比較的容易であるにも係わらず、海藻相の季節性・地域性、局所性を見出すことを可能にした。さらに、統計モデルを用いる事で、漂着海草・海藻データを活用した種の



図—5.1 出現確率の使い方。X 港ではどの種も出現確率が高いことから、保全・再生・創出の対象種を自由に選択できる。しかし、Y 港では種 C の出現確率が低く、対象種の選択肢から外す事が望ましい。

出現確率の空間分布を推定出来る事を示した。

漂着海草・海藻に基づく調査手法は、既存の潜水等による直接観測と空中写真や衛星画像の解析をさらに補完する事が可能となり、今後、より効率的な海草・海藻分布の現状把握が可能になるものと期待される。

5.2 今後の応用

(1) 出現確率の使い方

本研究で示した海草・海藻の出現確率は、環境変数が評価パッチの中の代表値で与えられた上で推定された事や出現確率の意味に曖昧さがある事から、必ずその確率で対象種が出現する事を意味するものではない。しかし、少なくとも、種内であれば、パッチ間の確率の大小を比較する事はできる。さらに、出現確率の意味を柔軟に解釈して、種間での比較も可能であると考え、対象とする場所において、どの種なら保全・再生・創出を見込めるか、もしくは選択肢から外すべきかを検討する材料になり得る(図—5.1)。

モデルの観点から説明すると、本研究で推定した出現確率は、パッチの環境を代表させた空間スケールの中での確率と言え、たとえパッチ内であっても、例えば、熱源が近くにあり水温が高い場所等の局所的な環境が存在する事はあるので、そのような環境の下での確率を説明するものではない。実際に対象とする場所での保全・再生・創出に適した種を選定する場合は、評価パッチからさらに空間範囲を狭めていき、環境条件の局所性を考慮した詳細検討が必要になるであろう。ここで示した出現確率はその前段階のスクリーニングに使える材料になると考えられる。

(2) 新たに漂着海草・海藻調査を始める場合

本研究では、漂着海草・海藻調査の対象を瀬戸内海とした。瀬戸内海でも、今後、分布域が変遷する可能性があるため、

モニタリングを続けることで、分布域の知見を更新し、海草・海藻の分布の動態に関する理解にもつながる。

また、瀬戸内海以外でも漂着海草・海藻の調査を採用することで、海草・海藻の分布に関する理解が深まる事が期待される。ただし、その場合、漂着海草・海藻の動態は、瀬戸内海とは異なる事が想定されることから、既往文献の結果と比較しながら、その可能性を検証しつつ進める事が必要である。その場合、第4章で考察したとおり、あらかじめ種の分布域を予測した上で、調査範囲の偏りを避けるよう調査計画を立てる事が望ましい(図—5.2)。

(2024年12月13日受付)

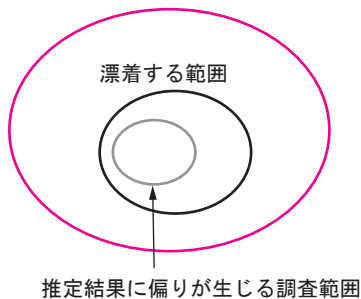
謝辞

本研究は、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(令和2年度からの3年間)の一部として実施した。さらに、広島港湾空港技術調査事務所からは、2023年3月及び5月の漂着データも提供して頂いた。漂着海草・海藻調査と海草・海藻に関する文献収集については、株式会社東京久栄に請け負って頂いた。第4章で扱った評価のパッチの座標は、神戸大内山教授と沿岸土砂管理研究グループの小碓主任研究官から提供頂いた。また、藤田勇及び野津厚両特別研究主幹からは、本論文の査読を通じて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) 環境省：生物多様性国家戦略 2023-2030, 2023.
- 2) 内閣府：第4期海洋基本計画, 2023.
- 3) Costanza, R., R. D'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, et al.: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253–260, 1997.
- 4) Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdés, C. DeYoung, L. Fonseca, and G. Grimsditch. *Blue Carbon. A rapid response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland, 2009.
- 5) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, N0.1, 10–20, 2019.
- 6) 国土交通省港湾局産業港湾課：「港湾脱炭素化推進計画」作成マニュアル, 2023.
- 7) 国土交通省：カーボンニュートラルポート(CNP)の形成に向けた検討会, URL https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr4_000050.html
- 8) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—, 第1巻総論編. 国土交通省港湾局監修, ぎょうせい：107p, 平成15年11月.

偏りのない推定結果を出せる調査範囲



図—5.2 漂着海草・海藻の調査範囲の設定方法の例。海草・海藻の漂着範囲に対して、包含されるように調査範囲を設定してしまうと、出現確率の推定に空間的な偏りが生じる。調査範囲は、海草・海藻の漂着範囲よりも広く設定し、さらに、空間的に均等に、もしくは水温分布に対して均等にデータの厚みを増していく事が望ましい。

- 9) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—, 第3巻藻場編. 国土交通省港湾局監修, ぎょうせい: 110p, 平成15年11月.
- 10) 水産庁, マリノフォーラム21: アマモ類の自然再生ガイドライン. URL <http://www.mf21.or.jp/pdf/amamo/guideline.pdf>
- 11) 水産庁漁港漁場整備部: 海水温上昇に対応した藻場保全・造成手法 (暫定版), 令和6年4月.
- 12) 環境省: 瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査について, URL http://www.env.go.jp/water/heisa/survey/result_setonaikai.html
- 13) 社団法人日本水産資源保護協会: 日本周辺の海藻植生 (大型褐藻を主として), 漁場環境調査検討事業, 昭和59年3月.
- 14) 社団法人日本水産資源保護協会: 評価基準・調査指針部会検討素材—わが国の環境生物相の類型化について (続) 抜萃—, 漁場環境調査検討事業, 昭和59年3月.
- 15) 吉田五郎: 瀬戸内海の藻場と漁業生産. 水産工学, Vol.49, 77–83, 2012.
- 16) UMI-POCHI (海ポチっ). URL <https://pari.mpat.go.jp/bdhome/>
- 17) 吉田吾郎, 寺脇利信, 山下亜純, 新井章吾, 樽谷賢治: 瀬戸内海から豊後水道にみるガラモ場の変化と水温勾配の関係, 海洋と生物, 33, 337–343, 2011.
- 18) 馬場将輔: 温暖化による大型褐藻類の生育反応および分布変動. 海生研研報, Vol. 26, 1–28, 2021.
- 19) Akita, S., K. Hashimoto, T. Hanyuda, and H. Kawai: Molecular phylogeny and biogeography of *Ecklonia* spp. (Laminariales, Phaeophyceae) in Japan revealed taxonomic revision of *E. kurome* and *E. stolonifera*. Phycologia 59: 330–339, 2020. <https://doi.org/10.1080/00318884.2020.1756123>.
- 20) Uwai, S., S. Takagi, T. Sekiguchi, N. Emura, T. Morita, A. Kurashima, and Y. Sato: Inconsistency between morphological diversity and genetic structuring: Proposal for one species of *Undaria* in Japan. Botanica Marina 66: 81–90, 2023. <https://doi.org/10.1515/bot-2022-0048>.
- 21) Okura S, Hosokawa S: Representativeness and certainty of sea surface temperature from MODIS in semi-enclosed bays. Coastal Engineering Journal 64: 428–441, 2022.
- 22) 大倉翔太, 細川真也, 本間翔太, 和泉隆夫, 内山雄介: 東京湾内及び湾口の水温が外洋水の波及から受ける影響, 港湾空港技術研究所資料, No.1416, pp30, 2024.
- 23) 吉田吾郎, 島袋寛盛, 加藤亜記, 梶田淳, 三浦俊一: 瀬戸内海西部における褐藻クロメの生態学的特徴—II. 裸地化後の群落再生過程—. Algal Resources, Vol. 13, 151–162, 2020.
- 24) Thiel, M., and L. Gutow: The ecology of rafting in the marine environment. I. The floating substrata. Edited by R N Gibson and R J A Atkinson. Oceanography and Marine Biology 42: 181–263, 2005.
- 25) Thiel, M., and L. Gutow: The ecology of rafting in the marine environment. II. The rafting organisms and community. Edited by R N Gibson, J D M Gordon, and R J A Atkinson. Oceanography and Marine Biology 43: 279–418, 2005.
- 26) Thiel, M., and P. A. Haye: The ecology of rafting in the marine environment. III. Biogeographical and evolutionary consequences. Oceanography and Marine Biology 44: 323–429, 2006.
- 27) 吉田忠生: 流れ藻の海藻学的研究. 月刊海洋, Vol.36, 431–437, 2004.
- 28) 吉田忠生: 流れ藻の分布と移動に関する研究. 東北水研研究報告, Vol.23, 141–186, 1963. URL <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030843992.pdf>
- 29) 小松輝久, 立川賢一, 鰐坂哲郎: 流れ藻研究—総論—. 月刊海洋, Vol.38, 543–546, 2006.
- 30) 小松輝久, 杉本隆成: 流れ藻の輸送過程. 月刊地球, Vol.26, 464–468, 2008.
- 31) 山本昌幸, 藤原宗弘, 山賀賢一, 棚野元秀: 瀬戸内海中央部における流れ藻の構成種. 水産増殖, Vol.50, 375–376, 2002.
- 32) 八谷光介, 西垣友和, 井谷匡志, 和田洋藏: 若狭湾西部養老地区における流れ藻発生量の推定とその比重測定による浮遊期間の推定. 月刊海洋, Vol.37, 516–521, 2005.
- 33) 今井利為, 近山通正, 尾長幸夫: 漁場での寄り藻の分布. 水産増殖, Vol.42, 315–320, 1994.
- 34) Hosokawa, S., M. Nakaoka, E. Miyoshi, T. Kuwae: Seed dispersal in the seagrass *Zostera marina* is mostly within the parent bed in a protected bay. Mar Ecol Prog Ser 523: 41–56, 2015.
- 35) 三上温子, 小松輝久, 青木優和: 流れ藻の寿命. 月刊海洋, Vol.38, 570–574, 2006.
- 36) Källström, B., A. Nyqvist, P. Åberg, M. Bodin, and C. André: Seed rafting as a dispersal strategy for eelgrass (*Zostera marina*). Aquatic Botany 88: 148–153, 2008.
- 37) Kosako, T. Y. Uchiyama, M. Ubara, S. Hosokawa, K. Momota: Dispersal of rafting eelgrass seed and associated population connectivity in the Seto Inland Sea, Japan (submitting)
- 38) 乳原材, 内山雄介, 小裕大地, 細川真也: マルコフ連鎖に基づく瀬戸内海アマモ場の多世代コネクティビティ解析. 土木学会論文集特集号 (海岸工学) 論文, Vol. 79, 2023.
- 39) Uwai, S., D. Saito, and Y. Sato: Evaluation of cryptic invasion in Japanese *Undaria* populations based on mitochondrial haplotypic analysis. Botanica Marina 67: 411–419, 2024. <https://doi.org/10.1515/bot-2024-0002>.
- 40) Hosokawa, S., K. Momota, M. Sato, K. Watanabe, Y. Watanabe, S. Homma, S. Okura, S. Uwai, T. Kosako, Y. Uchiyama: Spatial scales of geographical isolation by distance and barriers, and heterogeneity in the genetic structure of a seagrass (submitting)
- 41) スコット・E・ページ著, 椿広計監訳, 長尾高弘訳: 多モデル思考, データを知恵に変える24の数値モデル. 森北出版, 418p, 2020.
- 42) R Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical

- Computing, Vienna, Austria, 2023. URL <https://www.R-project.org/>.
- 43) Gotelli NJ, Colwell RK: Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecol Lett* 4: 379–391, 2001.
 - 44) Chao, A., L. Jost: Coverage-based rarefaction and extrapolation: Standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology* 93: 2533–2547, 2012.
 - 45) Colwell, R.K., A. Chao, N. J. Gotelli, S. Y. Lin, C. X. Mao, R. L. Chazdon, J. T. Longino: Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *J Plant Ecol* 5: 3–21, 2012.
 - 46) Chao, A., N. J. Gotelli, T. C. Hsieh, E. L. Sander, Ma KH, R. K. Colwell, A. M. Ellison: Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecol Monogr* 84: 45–67, 2014.
 - 47) 細川真也, 百田恭輔: 港湾における小型無脊椎動物の種の多様性指数—2つのサンプリングエフォートの考え方の比較—, 港湾空港技術研究所資料, No.1361, pp30, 2019. URL https://www.pari.go.jp/report_search/detail.php?id=20191205143541
 - 48) Nakaoka, M., and K. Aioi: Ecology of seagrasses *Zostera* spp. (Zosteraceae) in Japanese waters: a review. *Otsuchi Marine Science* 26: 7–22, 2001.
 - 49) Yoshida, G., M. Uchimura, and M. Hiraoka: Persistent occurrence of floating *Ulva* green tide in Hiroshima Bay, Japan: seasonal succession and growth patterns of *Ulva pertusa* and *Ulva* spp. (Chlorophyta, Ulvales). *Hydrobiologia* 758: 223–233, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2292-3>.
 - 50) 生きものの好きの語る自然誌. <https://tonysharks.com/index.html#gsc.tab=0>
 - 51) 吉田吾郎, 島袋寛盛, 堀正和, 村瀬昇, 加藤亜記: 瀬戸内海西部における褐藻クロメの生態学的特徴—I. 現存量と生産量, および形態の多様性—I. 広島大学総合博物館研究報告, Vol. 12, 87–99, 2020.
 - 52) Kataoka, T., H. Hinata, and S. Kato: Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter. *Marine Pollution Bulletin* 77: 266–273, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.049>.
 - 53) Hinata, H., K. Mori, K. Ohno, Y. Miyao, and T. Kataoka: An estimation of the average residence times and onshore-offshore diffusivities of beached microplastics based on the population decay of tagged meso- and macrolitter. *Marine Pollution Bulletin* 122: 17–26, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.012>.
 - 54) Hinata, H., K. Ohno, N. Sagawa, T. Kataoka, and H. Takeoka: Numerical modeling of the beach process of marine plastics: 2. A diagnostic approach with onshore-offshore advection-diffusion equations for buoyant plastics. *Marine Pollution Bulletin* 160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111548>.
 - 55) Martin, T. G., B. A. Wintle, J. R. Rhodes, P. M. Kuhnert, S. A. Field, S. J. Low-Choy, A. J. Tyre, and H. P. Possingham: Zero tolerance ecology: Improving ecological inference by modelling the source of zero observations. *Ecology Letters* 8: 1235–1246, 2005.
 - 56) Ferrier, S., G. Watson, J. Pearce, and M. Drielsma: Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast New South Wales. I. Species-level modelling. *Biodiversity and Conservation* 11: 2275–2307, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1021302930424>.
 - 57) Phillips, S. J., M. Dudík, and R. E. Schapire A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings, Twenty-First International Conference on Machine Learning, ICML 2004*, 655–662, 2004.
 - 58) Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire: Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231–259, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
 - 59) 森下光之助: 機械学習を解釈する技術, 技術評論社, 2021.
 - 60) Jaynes, E. T.: Information theory and statistical mechanics. *Physical Review* 106: 620–630, 1957. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>.
 - 61) Merow, C., M. J. Smith, and J. A. Silander: A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058–1069, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>.
 - 62) Phillips, S. J., R. P. Anderson, M. Dudík, R. E. Schapire, and M. E. Blair: Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* 40: 887–893, 2017. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>.
 - 63) 坂口翔太: 森林遺伝育種のデータ解析方法 (実践編12) 生態ニッチモデリング (後編), 森林遺伝育種, Vol. 12, 73–81, 2023.
 - 64) 細川真也: アマモ場の再生方法についての検討と今後の課題, 港湾空港技術研究所資料, No.1332, pp24, 2017.
 - 65) Tolman, H. L.: User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, Camp Springs, Md., 2009.
 - 66) Soulsby, R. L.: Dynamics of marine sand, Thomas Telford Publications, 249pp, 1997.
 - 67) Phillips, S.: Fitting 'Maxent' Species Distribution Models with 'glmnet', 2022. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/maxnet/maxnet.pdf>
 - 68) Broström, G., Jin, J., Holmberg, H.: Generalized Linear Models with Clustering, 2024. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/glmmML/glmmML.pdf>
 - 69) 水上ひろき, 熊谷雄介, 高野雅典, 藤原晴雄: データ活用のための数理モデリング入門, 技術評論社, 2020.
 - 70) 川崎保夫, 石川雄介, 丸山康樹: アマモ場造成の適地選定法. 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第2号: 136–145, 1990.

- 71) Royle, J. A., R. B. Chandler, C. Yackulic, and J. D. Nichols: Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution* 3: 545–554, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00182.x>.
- 72) Renner, I. W., and D. I. Warton: Equivalence of MAXENT and Poisson Point Process Models for Species Distribution Modeling in Ecology. *Biometrics* 69: 274–281, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2012.01824.x>.
- 73) Aarts, G., J. Fieberg, and J. Matthiopoulos: Comparative interpretation of count, presence-absence and point methods for species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution* 3: 177–187, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00141.x>.
- 74) Gelfand, A. E., S. K. Sahu, and D. M. Holland: On the effect of preferential sampling in spatial prediction. *Environmetrics* 23: 565–578, 2012. <https://doi.org/10.1002/env.2169>.

付録 A 表層水温データの取り扱いと海藻の水温応答の解析方法

(1) 表層水温データの抽出方法

MODIS で得られる表層水温は、クオリティに応じたフラグが付けられている。Okura & Hosokawa (2022)¹⁾ は閉鎖性海域における表層 1 m の水温を十分な精度で代表できるフラグを提示しており、本研究でもその採用ルールを適用した。このルールを適用する事で、瀬戸内海の表層水温は、18 年間で水質計を用いて観測されてきた結果²⁾ とよく一致することが既に確認されている³⁾。

本研究で対象とした 2003 年から 2020 年までの 18 年間の瀬戸内海における平均水温の分布は、**図—A.1** に示すとおりであり、瀬間の違いが目視で確認できる。この平均水温の空間分布と外洋の特徴を比較しやすくするため、本文中では検査点を 22 点に絞って解析している。

(2) 水温分布の解析方法

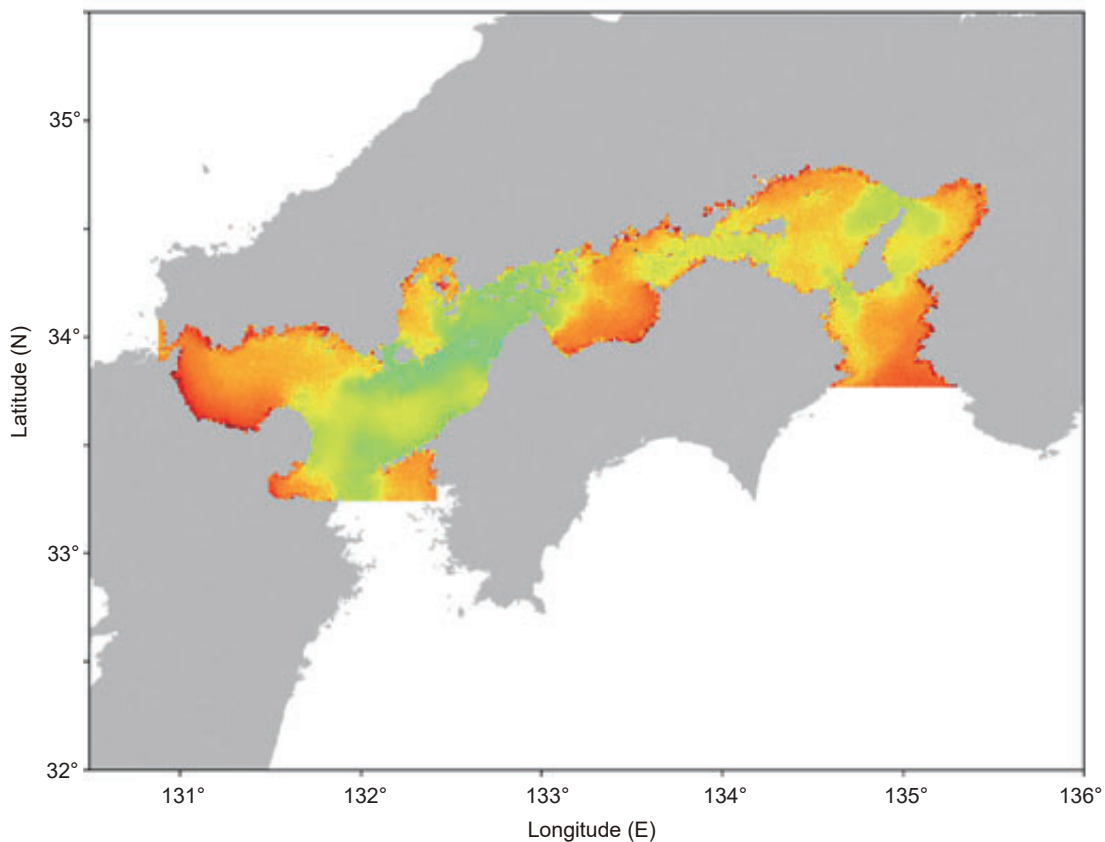
水温の時間方向の分布は、各検査点における 18 年間のデータに基づき、1 度のビン毎に集計した頻度分布として表した。MODIS で得られる表層水温には欠測が含まれる。欠測のパターンが季節性を持つ場合、頻度分布にバイアスが

生じてしまうが、本研究では目視により特定の期間の欠測が無い事を確認して、特別な処理を行わずに頻度分布を作図した。

表層水温の時間方向の分布の検査点間の類似性は、コサイン類似度を用いて数値化した。水温の時間分布は年間の確率分布として見ることもできる事から、確率分布間の距離を採用する考え方もあるが⁴⁾、ここでは、厳密性を追求していない事と分かりやすさのメリットからコサイン類似度を採用した。この類似度行列に基づき、R⁵⁾ のデフォルト関数である `hclust` を用いてウォード法により樹形図を作図した。

(3) 水温分布から見た海藻の多様性の解析方法

水温分布から見た海藻の多様性の解析は、以下の手順で実施した。まず、表層水温が各分布域の水温範囲 (**図—2.3**) に収まる場合に、対象とする種が生存するものとして判定した。解析対象は、本文で示した馬場 (2021)⁶⁾ のリストに含まれるホンダワラ類、チガイソ科、カジメ科の計 28 種とした。ただし、分布域の水温範囲は確実なものではないし、本研究で用いる検査点が、海藻が生育する局所の水温を評価しているとも限らない。これらの不確かさを考慮し、表層水温の分布が超過しても種が生存できるとする超過割合の許容値を

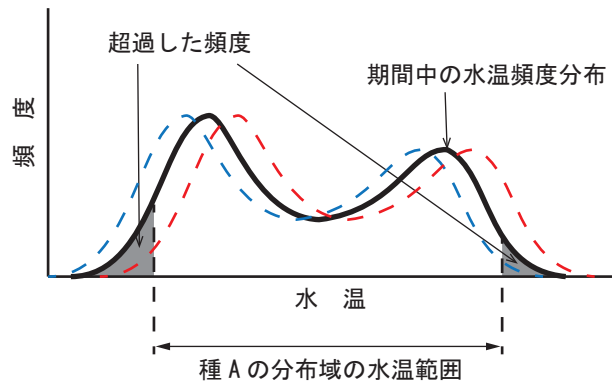


図—A.1 瀬戸内海の 18 年間ににおける平均表層水温の空間分布。

設定した。表層水温分布の超過割合がその許容値に収まる場合は生存とし、収まらない場合は生存できないと考えたシミュレーションを実施した（図—A.2）。

(4) 響灘付近の水温分布と海藻の多様性の応答

本文では、響灘付近の水温分布と海藻の多様性の応答について触れていない。響灘付近の水温分布は、豊後水道（W-5）に類似しているものの（図—2.7）、やや高水温側に分布する（図—A.3a）。この高水温側への分布により、許容する超過率が低くなる（厳しくなる）と、響灘では多様性が低下しやすい（図—A.3b）。この傾向は、日本水産資源保護協会が示す種の豊富さの報告とは異なる（図—2.2）。日本水産資源保護協会⁷⁾では、山口県日本海側として整理しており、響灘から離れた場所、もしくは響灘を含む広い範囲を対象としている可能性もある。この不確かさもあり、本文で



図—A.2 海藻の生存シミュレーションの考え方。表層水温が各種の適正水温を超過する割合が許容値に収まる場合は生存し、許容値を超える場合は死亡すると考えたシミュレーション。

は深い議論を避けた。

(5) 寒冷化と温暖化の影響解析

瀬戸内海の水温が寒冷化や温暖化した場合の海藻の多様性の変化について、馬場（2021）⁶⁾による分布域の水温範囲を用いて解析した。寒冷化と温暖化を想定し、それぞれ、現状の水温分布が 1°C の下降側へシフトした場合と 1°C の上昇側へシフトした場合の超過率を算出した（図—A.2）。つまり、現状の水温分布の端が、多様性が急激に変化する付近にあるほど、この解析によって、寒冷化もしくは温暖化の強い影響が見られることになる。

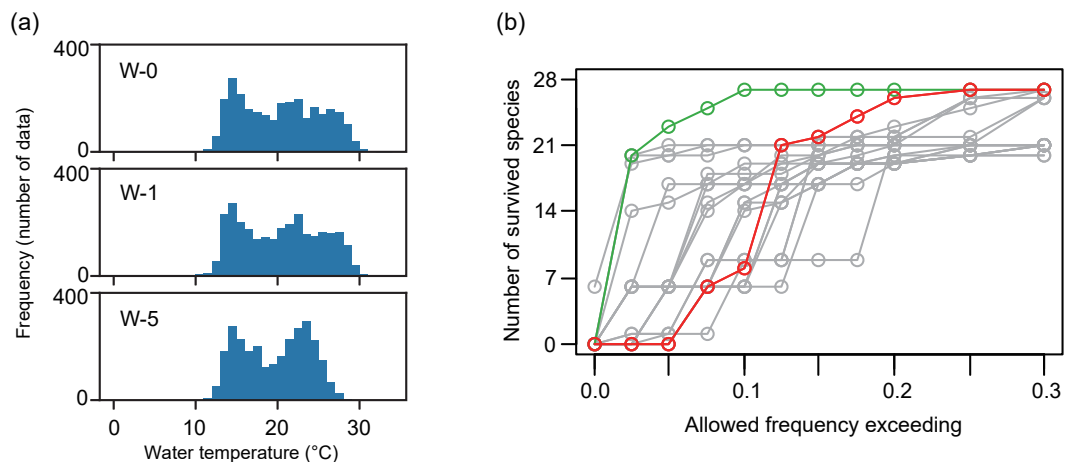
生存種数は、多くの場所では、現状（灰色）から 1°C 寒冷化（青色）する事で多くなり、 1°C 温暖化（赤色）する事で少なくなった（図—A.4）。これは、現状の水温分布の高温側ほど、生存できる種数の変化が急である事を理由としている（図—2.4）。

伊予灘のW-4及びW-8と安芸灘のW-10では、寒冷化及び温暖化に対してロバストであった（図—A.4）。しかし、安芸灘のW-9の生存種数は温暖化に対して脆弱であった。

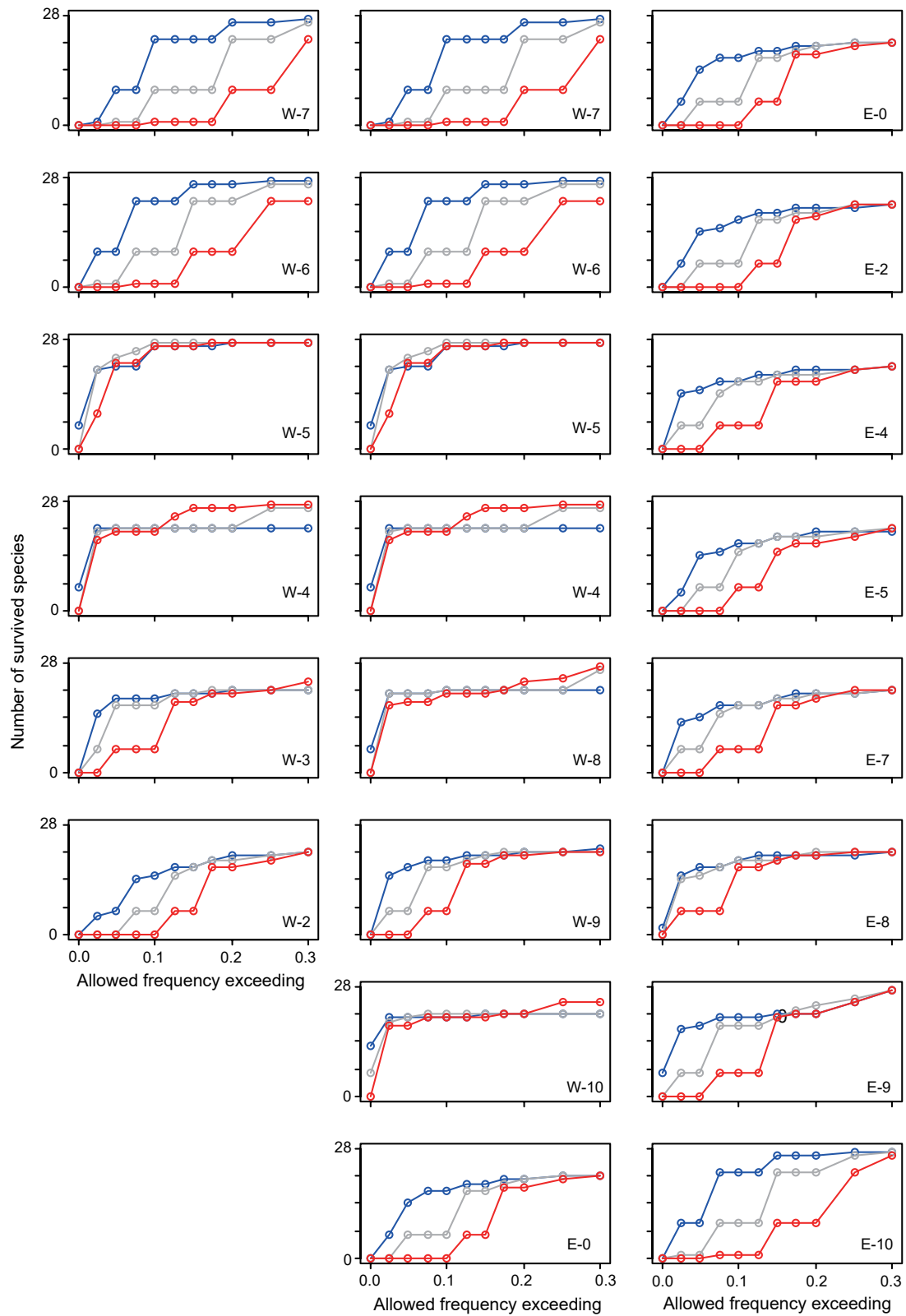
紀伊水道のE-9と豊後水道のW-5を比較すると、W-5は寒冷化及び温暖化のいずれに対してもロバストであるが、E-9では温暖化に対して生存種数が大きく減少した（図—2.9）。

参考文献

- 1) Okura S, Hosokawa S: Representativeness and certainty of sea surface temperature from MODIS in semi-enclosed bays. Coastal Engineering Journal 64: 428–441, 2022.
- 2) 瀬戸内海総合水質調査ホームページ, <https://www.pa.cgr.mlit.go.jp/suishitu/>
- 3) 令和3年度海域における藻場の分布可能性の評価及び



図—A.3 日本海側の響灘付近の表層水温と海藻の生存シミュレーションの結果。(a) 響灘付近の表層水温（W-0及びW-1）と豊後水道の表層水温（W-5）の比較と(b) 海藻の生存シミュレーションの結果。許容する超過率が低く（厳しく）ても、豊後水道（緑色）では高い多様性が保たれるものの、響灘付近（赤色）では急激に多様性が低下。



図—A.4 水温分布に基づいた生存する海藻の種数の感度解析。赤色は1°C 温暖化した場合（水温分布を高水温側に1°C シフトした場合）、青色は1°C 寒冷化した場合（水温分布を低水温側に1°C シフトした場合）の生存種数を示している。表示の順番は図—2.6 と同じである。

間接データに基づいた推定手法に関する研究委託，受託報告書．

- 4) 杉山将：確率分布間の距離推定：機械学習分野における最新動向，日本応用数理学会論文誌，第 23 巻，第 3 号，439–452，2013.
- 5) R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- 6) 馬場将輔：温暖化による大型褐藻類の生育反応および分布変動．海生研報，Vol. 26, 1–28, 2021.
- 7) 社団法人日本水産資源保護協会：評価基準・調査指針部会検討素材—わが国の環境生物相の類型化について（続）抜萃一，漁場環境調査検討事業，昭和 59 年3月．

付録 B 漂着海草・海藻の種組成の解析

(1) 方法

種組成は、本文の式 (1) に基づき、2つの場所間の構成の類似性を求めて、主座標解析 (Principal Coordinate Analysis, PCoA) により視覚化した。PCoA では、1 から類似度を引いた非類似度に変換した行列を求め、それから固有値及び固有ベクトルを求める事で類似性を可視化できる。PCoA の解析は、R¹⁾ の vegan パッケージ²⁾ の中の capscale 関数を用いた。

(2) 結果

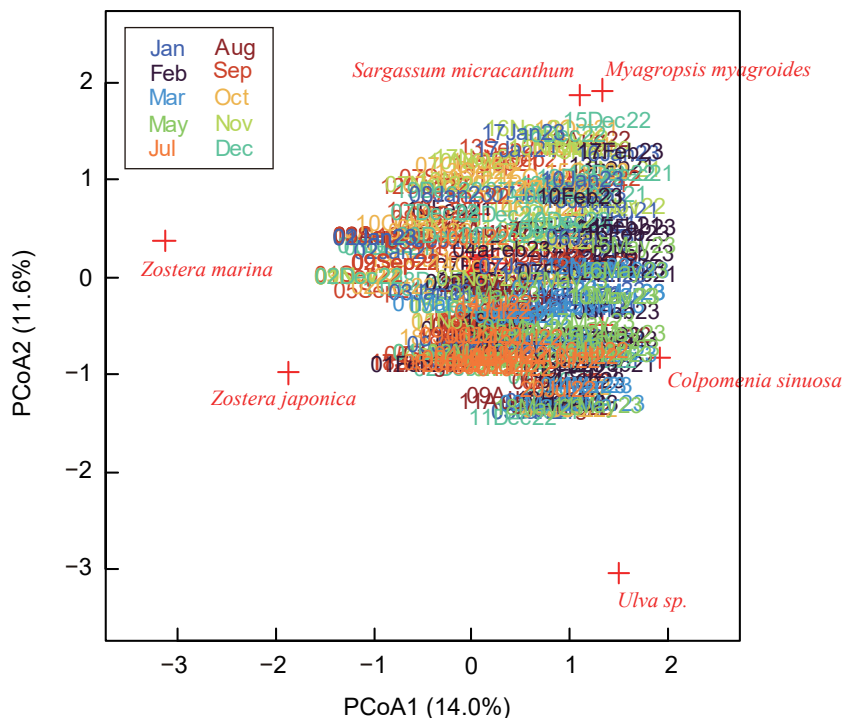
サイトスコアに明確なクラスターは形成されていないが、寒色系が右側に分布し、暖色系が下側の左側に分布しているように見える (図—B.1)。

種のスコアのほとんどは、サイトスコアの中に埋もれているものの、アマモ (*Zostera marina*)、コアマモ (*Zostera japonica*)、アオサ属の一種 (*Ulva* sp.)、フクロノリ (*Colpomenia sinuosa*)、ジョロモク (*Myagropsis myagroides*) 及びトゲモク (*Sargassum micracanthum*) がサイトスコアの周辺に分布して

いる。右上に分布するジョロモク及びトゲモクは、本文に示すとおり、夏季にはほとんど観測されず、冬季を中心として観測されている種である。右下に分布するフクロノリも冬季を中心として観測される種であるが、ジョロモクとトゲモクの出現時期からややずれている。

参考文献

- 1) R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. URL <https://www.R-project.org/>.
- 2) Oksanen J, Simpson GL, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista HBA, John RF, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill MO, Lahti L, McGlinn D, Ouellette MH, Cunha ER, Smith T, Stier A, Ter Braak CJF, Weedon J: Community Ecology Package, 2022. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>



図—B.1 漂着海草・海藻の観測結果の主座標分析。観測の有無（在・不在）から Sørensen 類似度に基づき地点もしくは調査月間の類似度行列を求めて主座標分析を行った。調査の地点と月はサイトスコアとして出力し、種の分布は種のスコアを表示している。

付録 C バックグラウンドの設定が Maxent の解析結果に与える影響

(1) Maxent の海藻分布への適用にあたっての問題点

Maxent の正式な解説サイトでは (https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/), 陸上哺乳類であるマナケモノを題材に使った平面二次元の解析例が紹介されている。しかし、海草と海藻は、水深が浅い沿岸域に分布しており、その分布域は一次的に考える事もできる。Maxent の場合、解析対象となる空間（以下、バックグラウンド）の設定が解析結果に影響する事から、海草・海藻の生育分布の推定において、バックグラウンドを平面二次元とするか、一次元とするか、十分な検討が必要である。

この付録では、バックグラウンドについて、海岸線の一次元の情報を取り入れた場合と海域の二次元の情報を取り入れた場合の Maxent による解析結果を比較することで、その違いを整理し、どちらが適しているか考察した。

(2) 方法

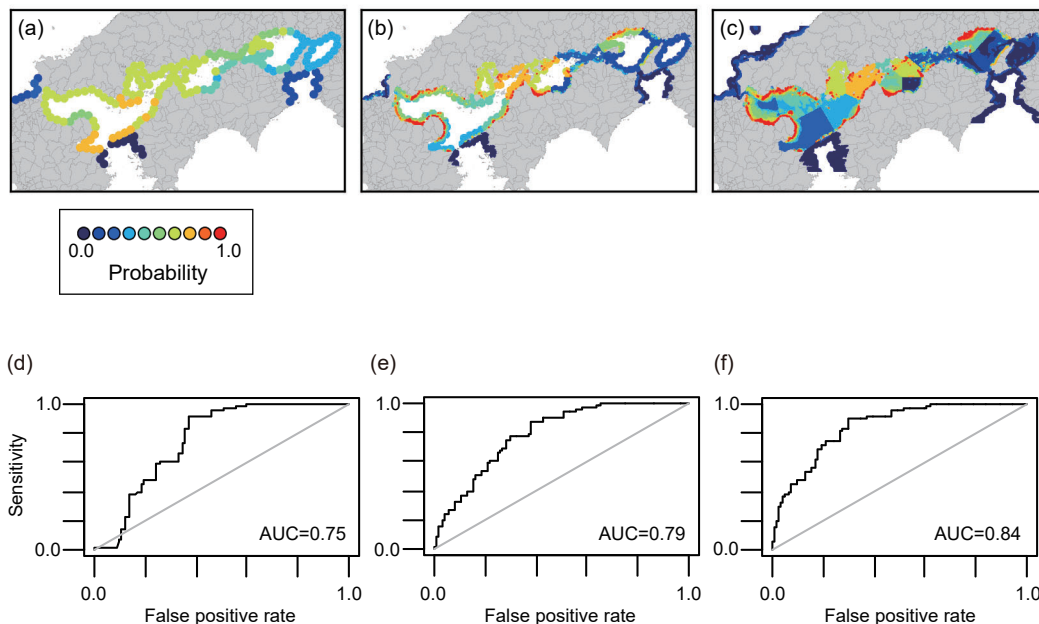
バックグラウンドについては、海岸線の一次元と海域の二次元の2つを比較した。海岸線の一次元をバックグラウンドとするモデルでは、海岸線上に半径 5 km のパッチを評価点とし、その中で環境は均質とした（本文で採用した方法）。海域の二次元をバックグラウンドとするモデルでは、波浪の解析グ

リッド（1/96° 格子）の全てを評価点とした。すなわち、波による底面せん断応力については高解像度な空間分布があり、水温については、海域ごとの空間的に粗い評価となっている（図—4.2）。さらに、これらの中間的なモデルとして、バックグラウンドは、海岸線の一次元を評価するためのパッチの範囲を適用するものの、その中で波浪には、解析グリッドに従った分布を考慮した。解析対象はアマモとし、既往文献の網羅的及び特定の種を対象とした調査結果と漂着データの在データを目的変数とした。

(3) 結果と考察

瀬戸内海全体の大局的な予測傾向に目を向けると、アマモの出現確率は、響灘、豊後水道、大阪湾、紀伊水道で比較的低く、3つのバックグラウンドの間に大きな差はない（図—C.1a, b, c）。しかし、パッチ内に波浪の分布を考慮した場合（図—C.1b）と海域二次元をバックグラウンドとした場合（図—C.1c）、周防灘や燐後灘の海岸線の一部でオレンジ色になっている場所（出現確率が高くなっている場所）を確認できる。一方で、海岸線の一次元をバックグラウンドとした場合（図—C.1a）、これらほど高い出現確率は見られない。

3つのモデルの Receiver Operating Characteristic (ROC) 曲線は 1 対 1 のラインよりも上側にあり、いずれのモデルもある程度の予測性能を有していると判断できる。なお、3つの



図—C.1 バックグラウンドの違いによる解析結果の比較。(a) パッチ内で環境は均質とした場合の出現確率（本文で採用した方法であり、図—4.10bの結果と同じ）、(b) パッチ外の環境は無視するがパッチ内では環境分布を考慮した場合の出現確率、(c) 海域内すべての環境分布を考慮した場合の出現確率を示し、パネル d, e, f は、それぞれに対応する Receiver Operating Characteristic (ROC) 曲線を示している。パッチのサイズは半径 5 km とした。ROC 曲線が 1 対 1 のラインより上にあるモデルは、少なくともランダムなモデルよりも予測性能が高いと判断できる。また、ROC 曲線は感度（True positive rate）が 1 に近い程よいモデルであり、Area Under the Curve（AUC：ROC 曲線の下側領域の面積の事）が 1.0 に近いほどモデルの予測性能が高いと評価される。

モデルの ROC を比較すると、海域二次元をバックグラウンドとしたモデルが最も予測性能が高いと判断できているように見えるが、これはバックグラウンドの範囲に依存するものであり、その解釈は妥当ではない (4.3 を参照)。むしろ、環境変数に対する出現確率の応答を見ると、パッチ内に波浪の分布を考慮したモデルと海域二次元をバックグラウンドとしたモデルが優れているとは言えそうもない (図—C.2)。

アマモの分布は、波浪による底面せん断応力とアマモの地下茎が張る底泥土粒子の応力との力学的バランスが崩れる限界値以内であると説明される事が多く、その指標として以下のシーلز数 (ϕ_m) が使われる：

$$\phi_m = \frac{\tau_{bm}/\rho}{sgd} \quad (C.1)$$

ここに、 τ_{bm} は波浪による最大底面せん断応力 (Pa)、 ρ は水の単位体積重量 (kg m^{-3})、 s は土粒子 (ρ_s) と水の単位体積重量から求められる土粒子の水中比重 ($= (\rho_s - \rho)/\rho$)、 d は土粒子の直径である (m)。アマモ場が成立するシーلز数は 0.08 から 0.5 までの範囲で幅がある²⁾。土粒子の水中比重と直径を、それぞれ、1.65 と 0.5 mm とした場合、これらのシーلز数に対応する底面せん断応力は 0.64 から 4.0

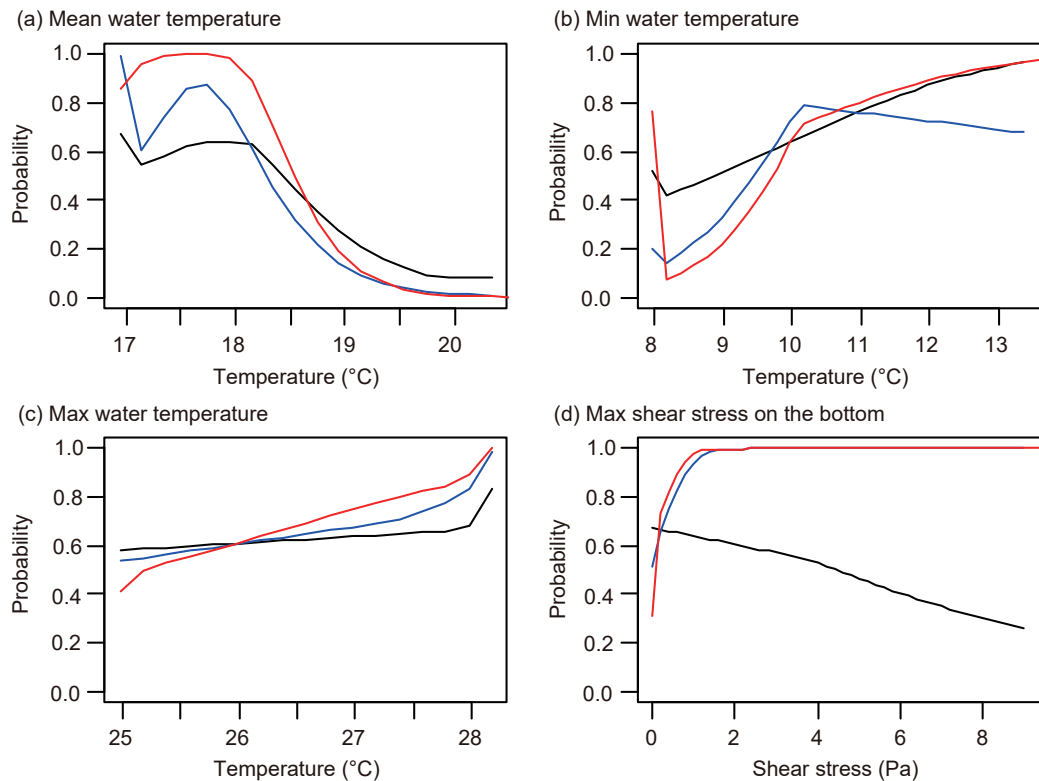
Pa となる。すなわち、環境変数として考慮した最大底面せん断応力は、アマモ場が成立可能な最大底面せん断応力よりも倍以上の範囲にあり、この範囲の下で、出現確率が高くなる傾向を示す結果は明らかに不適切である。

波浪による底面せん断応力は、水深が浅い程強くなるため、海岸線付近の方が数十 m の水深がある瀬戸内海瀬中央付近よりも大きい。このため、海域二次元もしくはパッチ内の底面せん断応力の分布を考慮した Maxent のモデルでは、底面せん断応力が強い範囲の出現確率が上がる結果を示したものと考えられる。

繰り返しになるが、Maxent においては、バックグラウンドの設定が解析結果に影響する¹⁾。この明らかに解釈性が悪い結果は、バックグラウンドを平面二次元的に設定したケースに見られており、その影響によるものと判断していいであろう。海の情報は海面の水平二次元的な情報で提供されることが多いが、比較的浅い場所に生育する海草や海藻にとっては、その情報の多くは、Maxent を解析手法として使う限り、分布範囲外にある余計な情報である。

(4) まとめ

水深が比較的浅い場所に生育する海草・海藻の出現に対



図—C.2 バックグラウンドの違いによる解析結果. (a) 平均水温, (b) 最低水温, (c) 最高水温, 及び (d) 最高底面せん断応力に対する出現確率の応答を示している。黒線、青線、赤線は、それぞれ、パッチ内の環境が均質とした解析結果 (本文で採用した方法)、パッチ外の環境は無視するがパッチ内では環境分布を考慮した解析結果、及び海域内すべての環境分布を考慮した解析結果を示している。

して、Maxent のバックグラウンドとして浅い場所のみを設定した場合と深い場所も含めて設定した場合では、いずれも優劣をつける事が難しい予測性能であった。しかし、応答曲線を見ると、深い場所も含めてバックグラウンドを設定したモデルでは、明らかに解釈性が悪い結果を示した。これは、半径 5 km の範囲の中の環境勾配を考慮したモデルでも同様の事が言えた。

以上より、海草・海藻の分布を Maxent でモデル化する場合、解析対象空間として、海域内の全水深帯を考慮するのではなく、可能な限り浅い領域に限定する必要がある。また、その領域でも、海草・海藻にとっての生育範囲を超えている

可能性もある事から、環境変数の空間代表性を十分に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Merow, C., M. J. Smith, and J. A. Silander: A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058–1069, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>.
- 2) 細川真也：アマモ場の再生方法についての検討と今後の課題，港湾空港技術研究所資料，No.1332，pp24，2017.