

西日本沿岸における藻場と藻類養殖への気候変動の影響評価と将来予測

水産機構 瀬戸内海区水産研究所
吉田 吾郎

1. 研究の背景～沿岸域の水温上昇と磯焼けの拡大～

日本沿岸には多様な海藻がつくる‘藻場’が豊かに広がる。藻場は多くの水産資源を育み、日本人は古来その恵みを享受してきた。しかし、近年‘磯焼け’と呼ばれる藻場の衰退・消失が各地で急速に広がっている。特に、黒潮や対馬暖流が沖合を流れる西日本（本州太平洋岸・四国・九州）沿岸では、1990年代初頭と比較し、明らかなだけですでに20%の藻場が消失した（秋本・松村 2010）。磯焼けは海の砂漠化であり、生息・産卵場等として藻場を利用している生物、またそれらを漁獲対象とする漁業にも大きな影響が出ている。

磯焼けが拡大した背景には、過去数10年にわたり上昇を続けている沿岸水温がある。特に西日本周辺は過去100年で表層の平均水温が1℃以上も上昇している（気象庁 HP 2018 参照）。水温の上昇を背景に、もともと熱帯域に多い植食性魚類やウニ類等の活動が活発になり、これらの採食量が海藻の生産量を上回り、従来の生産―消費のバランスが崩れることが磯焼けの主要因とされている（水産庁 2007）。

西日本にあっても日本最大の半閉鎖性海域である瀬戸内海では、未だ大規模な磯焼けの発生の報告は無く、豊かな漁場としての藻場が残る。また、瀬戸内海ではノリやワカメ等の海藻養殖も重要な産業として盛んに行われている。瀬戸内海は暖流の影響が届きにくく、また水深が浅いため冬季を中心に外海域と比較して水温が大きく低下し、植食性動物の活動が抑えられる等、海藻の生育に適した環境が未だ維持されていると考えられる。しかし、一方で海域内の水温も上昇を続けており、今後のさらなる上昇により磯焼け現象が海域内部に侵入・拡大し、重要な基幹産業である漁業・養殖業に大きな影響が生じる懸念がある。

このような背景から、本課題では、①モニタリングや実験を通じて水温上昇が藻場生態系に及ぼす影響の実態を把握し、藻場の変化の機構を理解すること、②瀬戸内海とそれに接続する黒潮沿岸域を対象として、過去の水温環境の変遷を明らかにし藻場の変化との関連を明らかにすること、③上述の海域において、気候変動シナリオに基づいた数値シミュレーションにより水温環境の将来の変化を予測し、藻場の分布の変化を予測すること、さらに、④水温環境の変化がノリ等の海藻養殖に及ぼす影響を評価すること、等に取り組んだ。以下、研究の概要を述べる。

2. 研究の概要

1) モニタリングで明らかになった藻場生態系の変化の法則性

温暖化による藻場の変化を予測するためには、磯焼けに至るまでの藻場の変化の過程を

詳細に把握し、変化のターニングポイントとそれをもたらす水温環境との因果関係を理解する必要がある。九州西岸（長崎県沿岸）では多くの定点で長期モニタリングを継続し、藻場の変化に係る情報を蓄積している。野母崎では 2012 年以降アラメ・カジメ類（温帯性コンブ類）や温帯性ホンダワラ類による藻場が魚類の食害を受け、単一のホンダワラ類（ノコギリモク）による藻場に、さらに小型海藻による藻場に変貌した。また、九州西・北沿岸では 2013 年の夏季の異常高水温によりアラメ・カジメ類が広域にわたり枯死流出し藻場の衰退が加速化したこと、また場所によってはサンゴや南方系ホンダワラ類が分布を拡大する等の状況が確認された。一方、瀬戸内海西部から豊後水道東部（宇和海）では、同海域間にみられる大きな水温勾配に沿って藻場の現状を把握した。この地理的範囲では、1）アラメ・カジメ類と温帯性ホンダワラ類による藻場→2）温帯性ホンダワラ類のみによる藻場→3）小型海藻による藻場→4）磯焼け状態の中に一部熱帯性ホンダワラ類（ヒイラギモク）の藻場やサンゴ群落が成立、という変化が認められた。また、1990 年代以降、アラメ・カジメ類の藻場の南限が 30 km 程度北方へ後退していた。

瀬戸内海～豊後水道でみられる水温勾配に沿った藻場の段階的な変化は、九州西岸で観察された藻場の経時的変化と共通しており、藻場の変化（衰退過程）系列には一定の法則性があること、またその変化は水温環境と密接に関連することが明らかとなった。

2) 藻場生態系の変化のメカニズムを探る～室内実験から～

藻場の変化と水温環境との因果関係を明瞭にし、将来予測に活用するために、1) 藻場の海藻の高温に対する脆弱性、2) 植食性魚類の採食活動へ及ぼす水温等諸要因の影響を実験的に検討した。

水温を制御した培養実験の結果、西日本沿岸のホンダワラ類の主要種ノコギリモクの光合成活性は 30℃ 下でも維持されるのに対し、アラメ・カジメ類の主要種であるクロメの光合成活性は短時間に大きく低下した。また、温帯性のホンダワラ類の生育上限温度が 30～32℃ であるのに対し、アラメ・カジメ類は 28～29℃ であり、クロメは 29℃ 下では 6 日未滿で枯死した。このように、コンブの仲間であるアラメ・カジメ類は、温暖化により進むとされる夏季の高水温に対しより脆弱であった。ホンダワラ類は高温に対して比較的耐性があるが、西日本で分布を拡大しつつある熱帯性のヒイラギモクの生育上限温度は 33℃ と、温帯性種より高かった。

西日本の主要な植食性魚類であるアイゴの採食行動に及ぼす水温や群れのサイズの影響や、海藻の嗜好性等について室内実験を行った。アイゴは水温が高いほど採食量が大きく、さらに群れサイズが大きくなると‘食い散らかし’による海藻の藻体脱落量が大きくなり藻場への影響が多くなること、またアラメ・カジメ類やノコギリモク等の極相種はアイゴの嗜好性が比較的低い反面、純群落を形成するために食圧が分散しにくく、かつ藻体の再生力が低いために、より影響を受けやすいことなどが明らかになった。

3) モデルによる過去の水温環境の再現～藻場分布との照合～

瀬戸内海とそれに接続する黒潮沿岸域を対象として、既存の瀬戸内海モデルを改良した新たな黒潮～瀬戸内海流動モデルを構築した。このモデルの目的は、瀬戸内海の水温等の物理的環境を精緻に再現することであり、そのための改良点および特徴は、計算領域を黒

潮流域に拡大し瀬戸内海への外海の影響を評価できること、沿岸域の藻場分布等小さな地理的スケールに対応するため高解像度（1 km）であること、風や熱フラックス、外洋側諸条件に加え、河川流入や潮汐の影響等特に沿岸域の環境に大きな影響を及ぼすパラメータを組み込んだこと、等である。同モデルは、また気候変動シナリオに基づいた該当海域の水温の将来予測を行うためのプラットフォームでもある。

一方、瀬戸内海から黒潮沿岸域の過去の藻場分布（第4回自然環境保全基礎調査；環境庁自然保護局 1994）および現状の藻場分布のGISマップを作製した。現状の藻場分布は1990年代以降に実施された水産庁や各県の水産試験場による調査等の既往知見、また本プロ研等において独自に行った調査結果に基づいてマッピングした。

マップにした該当海域における現状の藻場分布と、上述したモデルにより再現した1993年～2014年の水温環境とを照合し、両者の関係を検討した。前述のとおり、1990年代初頭と比較して豊後水道や紀伊水道ではアラメ・カジメ類の藻場の南限には後退がみられたが、その主要な分布は表層水温15℃以下の年間日数が70日以上続く海域内にみられた。また、より温暖な海域でも局所的なアラメ・カジメ類の藻場の分布がみられた（例：四万十川河口付近）が、モデルは該当箇所における局所的な低水温環境の再現に成功していた。

15℃はアイゴ等植食性魚類の採食行動が完全に停止する水温であると報告されており（海生研 2012）、また15℃もしくはそれ以下に水温が低下する時期にアラメ・カジメ類の藻体生産は最も活発となる（八谷ら 2014）。冬季に2カ月程度食害を受けず、藻体が成長できることがアラメ・カジメ類の藻場の存続に必要な条件なのであろう。なお、四国・九州沿岸で分布を拡大している熱帯性ホンダワラ類ヒイラギモクは、表層水温が13℃以下に下がらない場所に分布しており、冬季水温が生育の制限要因になっていると考えられる。

4) 沿岸水温と藻場は将来どうなる？～気候変動シナリオに基づいた予測～

構築した新たな黒潮－瀬戸内海流動モデルを用いて、IPCC AR5における気候変動シナリオRCP2.6、RCP8.5に基づいて、現在（2010年代）、2050年代、2090年代の該当海域の水温環境と藻場の分布変化予測を行った。モデルの境界条件には、AR5対応の大気海洋結合モデルMIROC5の出力を用いて中央水産研究所が開発した日本近海高解像度モデルの計算結果を使用した。

温室効果ガスを現状のまま最大限に排出するRCP8.5のシナリオのもとでは、瀬戸内海の冬季水温は2010年代と比較して2050年代では2～3℃上昇し、2090年代ではほぼ海域全体で3℃以上の上昇がみられた。また夏季水温についても、2010年代はアラメ・カジメ類の致死温度である水温29℃のエリアは局所的な出現にとどまっていたのに対し、2050年代には周防灘・燧灘・播磨灘に、また2090年代にはほぼ瀬戸内海全域に拡大した。

この結果に基づいて、アラメ・カジメ類の藻場が存続する条件を、夏季水温：29℃以上が年間6日未満、冬季水温：15℃以下が年間70日以上、の双方を満たす海域と設定すると、藻場は2050年代までは伊予灘と備後・芸予瀬戸に残存するが、2090年代までには残念ながらほぼ全域にわたり消失することが予測された。

RCP2.6のケースについては現在計算中であり、本シンポジウムが開催される2月14日には結果を示したい。いずれにせよ、瀬戸内海において在来の藻場を守るためには、徹底的な温暖化対策を行い、将来にわたる水温の上昇を最小限に抑える必要がある。

5) 藻類養殖への気候変動の影響

前述したとおり、瀬戸内海ではノリ（アマノリ類）・ワカメ等の海藻養殖が重要な地域産業であるが、藻場と同様海藻の養殖においては水温環境が極めて重要である。ノリもワカメも、その種苗は夏季の間糸状体（ノリ）あるいは配偶体（ワカメ）といった微小世代として水槽等で管理され、秋季に一定の水温低下の後海域で育苗が行われる。この育苗開始の目安として、ノリもワカメも水温 23℃が目安となっている。しかし、秋季の水温はここ数十年上昇傾向にあり、ノリの育苗開始は 10~20 日ほど遅れ生産期間が全体的に短くなっている。ノリ、ワカメとも育苗期の高水温による生理障害が目立ち、特にワカメでは 2000 年代以降生産量が激減する等極めて深刻な状況にある（棚田 2015）。今後より水温上昇が進めば、これら従来の海藻養殖への負の影響はより顕著になり、産業として危機的な状況になることが懸念される。

本研究においては、ワカメに加え、今後新たな養殖対象種として有望なヒジキ、トサカノリについて、瀬戸内海~宇和海の水温勾配に沿って設定した試験地での養殖実験を行った。特にヒジキ、トサカノリは冬季温暖な宇和海で成長が大きく、冬季水温の上昇は必ずしも潜在的な海藻の生産力にマイナスではないと考えられた。しかし、2 月の平均水温が 15℃前後の宇和海南部ではワカメ、ヒジキとも激しい食害を受け収穫はできなかった。一方、トサカノリは、現在の瀬戸内海の低水温では育たなかったが、カゴに入れて養殖するため食害を受けず、温暖化進行後の有望な養殖対象種であると考えられた。海藻養殖は温暖化進行後も重要な産業として残る可能性はあるが、対象種によっては食害対策が不可欠になると考えられる。

3. 今後の展望

気候変動シナリオ RCP8.5 のもとでは、温帯性の主要な藻場であるアラメ・カジメ類の藻場は 2090 年代までに瀬戸内海からほぼ消失するという衝撃的な予測結果となった。今後瀬戸内海で藻場を残すためには、最大限の温暖化抑制への努力が必要である。また、2050 年代の予測から、アラメ・カジメの藻場が残る可能性が大きい海域があることも示唆された。重点海域を設定し、現在行われている磯焼け対策を予防的に講じる等、本研究の成果は藻場の保全施策に活用が可能である。また、瀬戸内海では在来の藻場が消失する一方で、熱帯性のホンダワラ類が侵入し、分布を拡大する可能性もある。熱帯性の藻場にも一定の生態系サービスは期待でき、新たな生態系の機能を利用する適応的な視点も今後必要となる。海藻養殖については、ノリ・ワカメ等の従来の養殖の適地は、今後減少すると予想される。一方、暖海性のトサカノリのように、新たな養殖対象種の導入も可能になるだろう。

本研究で示した瀬戸内海の水温環境の将来像は、藻場や海藻養殖だけでなく、他の生態系や、他の漁業・養殖業への影響評価・予測等にも応用が可能である。今後、本研究の成果が瀬戸内海を対象とする幅広い研究・施策の分野で貢献することを願っている。

なお、本研究は水産研究・教育機構の瀬戸内海区水産研究所（吉田・島袋寛盛）、西海区水産研究所（清本節夫・門田立・吉村拓）、水産大学校（村瀬昇・野田幹雄）、愛媛大学沿岸環境科学研究センター（郭新宇・吉江直樹・于晓杰）、愛媛県農林水産研究所水産研究センター（竹中彰一・河野芳巳・田村稔治）の協働で実施したものである。個々の詳細な研究成果については、各担当者のポスター発表を御覧ください。