

海洋熱波 (Marine Heatwaves : MHWs)

—現象の理解とその海洋生態系への負荷について—

NPO 法人海ロマン 21 理事長 小池勲夫

1 要約

2-1 海洋熱波とはどのような現象か？

2-2 海洋熱波の成因について

3 海洋熱波による海洋生態系への影響—これまでの経験から—

3-1 浅海生態系の基盤を構成する海草藻場、海藻藻場、サンゴ礁への影響

3-1-1 海草藻場への海洋熱波の影響

3-1-2 海藻藻場への海洋熱波の影響

3-1-3 海洋熱波のサンゴ礁への影響

3-2 海洋熱波の水産業への影響

4 今後の海洋熱波に関する予測と海洋生態系への影響

1 要約

海洋熱波 (Marine Heatwaves) はある海域の表層水温が一定期間にわたって従来の観測値の幅を外れて上昇する現象を指している。その広がり、昇温の持続期間、昇温の程度は様々であるが、これまで生じた 10 の極端な海洋熱波の内 8 つが 2010 年以降に生じており、近年増加の傾向にある。海洋生態系への脅威が海洋熱波において特に注目されるのは、多くの海洋熱波が外洋から沿岸域までの広がりを持ち、人間活動が集中する沿岸域での表層水温の上昇によって、海草・海藻藻場やサンゴ礁などの浅海生態系に大きな脅威を与えるからである。なお、この海洋熱波と言う用語は海洋表層の異常高温の持続による海洋生態系への影響に特に注目したものとされている。なお、このような現象は 2000 年以前にも熱帯域のサンゴ礁などでは観察されていたが、地球温暖化との関係で最近特に注目されて来た現象である。

海洋熱波の成因としては、ブロッキング高気圧などの大気側でのプロセスが支配した事例、エルニーニョ現象などの大気/海洋の相互作用による事例、西岸境界流などの強化など海洋側でのプロセスが主導した事例に分けられているが、その背後には多くの場合気候モードのような大規模な大気と海洋の相互作用の影響の存在が考えられている。また、熱帯域以外での多くの大規模な海洋熱波は、海洋上での長期化した高気圧システム (ブロッキング高気圧) と、その結果としての大気/海洋との相互作用に関係している。海洋熱波の成因から見て海洋熱波が生じやすいホットスポット海域には、5 つの西岸境界流とその続流域、中央・東部熱帯太平洋域、東部境界流領域などが挙げられる。また、もう 1 つのホットスポットは既に述べたブロッキング高気圧が生じやすい海域である。海洋熱波はこのように大気と海洋の相互作用に密接に関係している為、現在進行中の地球温暖化との関係も多く議論されている。IPCC の最新の評価報告書では、その頻度は温暖化が良く制御された SSPI-2.6 の条件下で、2081 - 2100 年には約 4 倍、さらに SSP5-8.5 の

条件下では8倍の頻度で生じるとの予測がなされている。

海洋熱波は、外洋域でも生じるがこれまでその影響が顕著に出ているのは、アメリカ西海岸、オーストラリア西岸、ニュージーランド南島、カリフォルニア沿岸などでの海草・海藻藻場や、グレートバリアリーフでのサンゴ礁などで、生態系の基盤を構成するこれらの生物群集の海洋熱波による崩壊が報告されている。これらの基盤生態系は、それらに付随する多くの生物群集の住処や餌を提供しており、その崩壊は食物連鎖を構成する多くの生物群集に及ぶことになる。また、これらの個々の事例では、海洋熱波による被害に加えて、海草藻場における高濁度水の流入や、コンブ藻場における食害の発生など複合的な要因で基盤生態系が崩壊した場合が多いことも報告されている。

海洋熱波による海洋生態系を通じた人間活動への負の影響は、有害藻類のブルームによるカニ漁の中止、餌の欠乏によるアワビなどの貝類やタラなど水産有用魚類の激減などを含め幅広い。これらの1つの海洋熱波による経済的なロス直接的なものでUS 800 万を超え、間接的なロスはUS 3.1 億を超すと推定されており、沿岸域の生物資源の経済的な重要性を示している。

海洋熱波の将来予測に関連して、全球の海表面水温(SST)に関しては既に1 年先までの予報が、エルニーニョ/ENSO などの大規模な気候モードの変化を予測するために業務的に行われている。また、サンゴ礁のように標的を絞った海域での予測もアメリカなどが主導して行われている。しかし、現在のCMIP5 やCMIP6 での気候モデルの精度では強力な海洋熱波に関しては予測が出来るが、これまでに生じた弱いが長期に亘る海洋熱波に関してはその把握があまり良くないことが示されている。従って、物理的な環境が複雑であり特に被害が大きい浅海域での海洋熱波の予測は今後の大きな課題である。

2-1 海洋熱波とはどのような現象か？

人間活動による気候の変化は、海洋表層での熱吸収を変化させる。地球表層の大気に蓄積された約90%の熱は海洋に吸収され、この半世紀では10 年に約0.11℃の割合で海面水温が上昇している(Smith, et al. 2021)。この水温上昇に応答して海洋では遊泳力を持つ多くの魚類がより極側へと移動している事象も含め、地球温暖化が海洋生態系に大きな影響を及ぼしている事が2022 年のIPCC 第六次評価報告書に詳細に記述されている(Cooley, et al. 2022)。さらにこのような比較的ゆっくりとした海洋の温暖化に加えて、より急激な海洋表層の高温化である海洋熱波(Marine Heatwaves: MHWs)が生じており、その頻度や強さを次第に増している事が分かってきた。これまで生じた10 の極めて極端な海洋熱波の内8 つが2010 年以降に生じているのである(Smith, et al. 2021)。

一方で、このような海洋表層での高温化と言う事は必ずしも新しい現象ではなく、20 世紀にも生じていたことも分かっている。例えば、熱帯域における大規模なサンゴの白化は1980 年代から生じており、海洋熱波による熱帯太平洋全体にわたるサンゴの白化現象は1998 年、2010 年、最近では2014-17 年に起こり、エルニーニョ現象や全球的な表面水温上昇と連動していた(Hughes, et al. 2017; Eakin et al. 2019)。また、短期的なイベントである場合が多い大気での熱波現象

と異なり、海洋熱波は数百万平方 km にも広がり、その高温域は数週間から数か月も持続し、さらに垂表層にまで影響を及ぼすことが知られている (Fox-Kemper, et al. 2021). なお、この海洋熱波と言う言葉は、2010-2011 年の夏にオーストラリア西部の沿岸を含む広い海域で生じた異常な高水温の持続現象で沿岸生態系に大きな被害が生じた時に使われて一般的になったとされ (Pearce, et al. 2011)、この用語には海洋表層の異常高温の持続による海洋生態系への影響に特に注目したものと言う経緯がある。

海洋熱波はある特定の海域における海水温が、その海域での季節的に変化する平均水温値の閾値を大きく超えた状態が一定期間以上持続した場合を指すと定義されているが、その閾値や持続期間などは研究者により異なっている。例えば、良く使われる Hobday, et al. (2016) の定義は、閾値を気候値 (その季節の過去 30 年間の観測における平均値) から 90% 以上外れた高温で、持続期間が 5 日より長いものを海洋熱波 (Ocean Heatwave) と定義している (図 1A で赤くしめされた部分)。また、短いものは Heat spike と呼んでいる。さらに、Hobday et al. (2018) は海洋熱波が気候値からどの程度上昇したかで、その強度を 4 段階に分けることを提案している (図 1B)。なお、この海洋熱波による異常値の表現方法はその目的によっても異なってくる。例えばサンゴの白化への影響を見る場合は、絶対的な閾値を決めてそれ以上になった水温の積算を見るやり方がサンゴの応答との関係では適切と言う報告もある (Liu, et al. 2014)。

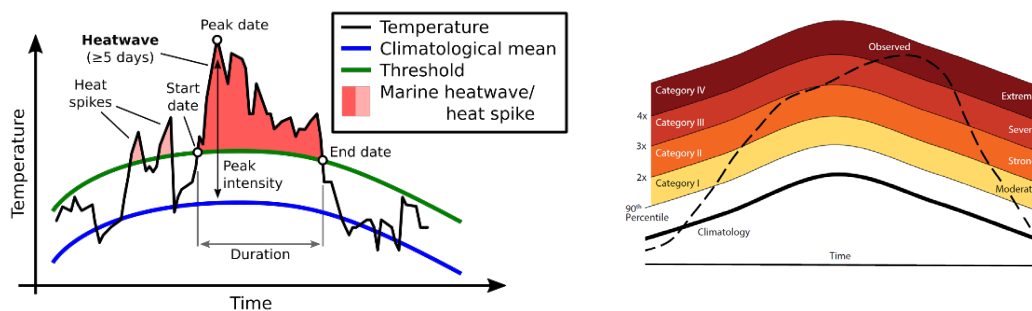


図 1 海洋熱波の定義の 1 つの例 (左) とその強さのカテゴリ分類法 (右) (Hobday et al. 2016, 2018)

さらに、海洋熱波の定義に関しては混乱が生じていると言う研究者もいる。それは、熱波熱波を当初の定義のように過去30年以上のその海域での平均水温と比較して異常に高い水温が持続した場合を指す時と、気候変動により昇温しつつある現状の中で、極端に高い水温を指す場合の二つがあるからである (Amaya, et al. 2023)。ここで問題となるのは、「通常の水温と比較して」と言う場合の通常の水温とは何かと言う事である。当初の定義に従えば、海洋表面水温が上昇しつつある現在では、海洋熱波と定義される現象はそのままでも数が次第に増えていくことになる。一方、通常の水温を動かした場合は、過去との比較が難しくなる一方で、めったに生じない事象としての海洋熱波の定義を反映したものになる。このような“固定した通常水温”と“移

動した通常水温”では、海洋熱波の強度、持続期間などが異なってくるが、沿岸域での水産養殖などに対する情報としてはどちらの方が適切であろうか。例えば、アメリカ東海岸のメイン湾では2021年には年の80%が“固定した通常水温”の定義では海洋熱波となってしまう、警報の意味をなさない状態である。従って、現在ではアメリカ大気海洋局（NOAA）では“移動した通常水温”での海洋熱波の情報も合わせて出すようになっており、その違いをはっきり理解した上での情報の活用を呼び掛けている。

海洋熱波の観測は通常衛星を用いた全球の表面水温（SST）の日々のデータを用いて行われるが、これは1980年代からの長期にわたる時系列データとして利用できるからである。一方、表面下の水温分布に関しては、限られた期間の限られた海域しかデータを得る事が出来ないため、海洋熱波の海洋内部の特性に関しての情報が乏しいのが現状である。例えば、生態系の保全に関し海洋熱波の浅海域での底生生物群集への影響が懸念されているが、その環境での鉛直的な水温データは十分ではない。また、後で紹介するように海洋熱波の成因やその発達条件には、表層における混合層の厚みやその季節的な変化などが影響する場合もある（Holbrook, et al. 2020）。従って、衛星データに合わせて現場での観測も海洋熱波を理解しその予測を行うには重要である。

図2は1980年から2020年に至るまでの全海洋での海洋熱波の年代ごとの出現日数、出現海域、各海域でのその強さの区分、その継続日数、気候値から昇温の程度などをまとめたものである（Smith, et al. 2023）。この図に示したように、大規模で強い海洋熱波が既に述べた2011年のオーストラリア西岸、2015 - 2016年の中部から東部熱帯太平洋、2016, 2017, 2020年のサンゴ海、2014 - 2016年の長期に亘った北東太平洋域など熱帯から寒帯まで広い海域で起こっている事が分かる。なお、注意すべきは海洋における長短期の気候値を大きく外れる昇温現象は、海洋気候における自然な変動の一つである場合が多く、これまでサンゴ礁などでは何十年に亘って報告されてきた。しかし、図2に示されているように人為的な気候温暖化の影響で海洋熱波の頻度や強さが増加して来ていることが、海洋生態系への影響を考える場合に大きな問題となって来たのである。

これまでの海洋熱波に関する報告では、その海域の広がりには200－5000平方キロ、期間は10日から400日、気温上昇は1.5－4.5℃の範囲でそれらの殆どが沿岸域を含んでいる。このような沿岸域での急激な海水温上昇は、特に沿岸生態系において生活基盤を作るサンゴ礁、海草藻場、海藻藻場などの浅海域生態系に大きな負荷を与える事になる。また、沿岸域でのアワビやサケなどの養殖に対しても負の影響が大きいことから、海洋熱波は地球温暖化に伴い海洋生態系に大きな負荷を与える極端現象の一つとして最新の2022年のIPCCC/AR6評価報告書でも注目されている

（Cooley, et al., 2022）。この報告では、海洋熱波の成因に関する地球物理学的な検討についてまとめた後、これまでの世界の各海域での海洋熱波についてその海洋生態系や人間活動への影響について記述する。最後に大気海洋モデルによる海洋熱波の頻度やその大きさに関する今後の予測などについての研究にも触れる。

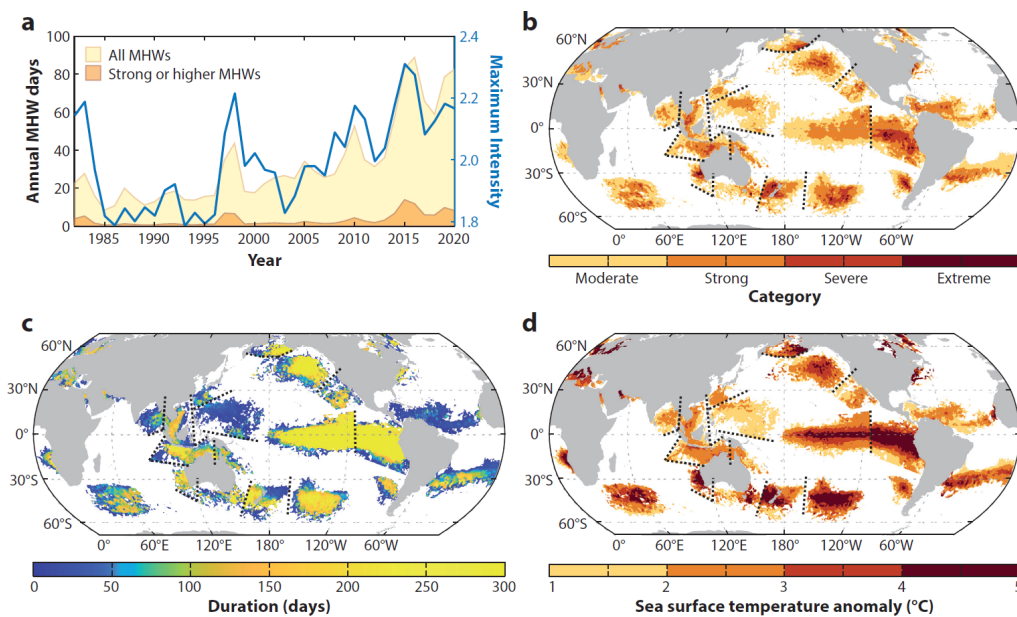


図2 極端なMHWの特性、 (a) 1980年からの各年におけるMHWの日数（黄色およびオレンジ色は、Hobday et al. (2018)の定義による強さの指標で区分2が黄色、区分3以上がオレンジで示している、また青線はその時の最大昇温値。 (b) - (d)はSmith et al. (2021)で抽出された34回の強いMHWにおける海域別の、 (b) 強度の違い、 (c) 持続期間、 (d) 表面水温の異常値の程度を示した (Smith et al. 2023)。

2-2 海洋熱波の成因について

Holbrook, et al. (2019) は、2016年までの海洋熱波に関連する論文と、1982 - 2016年までの衛星表面水温データの解析による海洋熱波の条件を合わせることで、海洋熱波における重要な海域的プロセス、大規模な気候モードの状態やその海洋熱波と関連するテレコミュニケーションなどを特定した。その結果、全球の殆どの海域において海洋熱波の強化や抑制の過程と、その時の大気と海洋との相互作用を示す気候モードとの間に一貫した関係があることを見出した。従って、後で述べるように個々の海洋熱波はその海域でのブロッキング高気圧の安定化や、西岸沿岸流の強化と言った現象が大きな要因となるが、その背後には気候モードのような大規模な大気と海洋の相互作用の影響が存在していると考えられる。

海洋熱波は基本的にはある海域での表面水温が、表層での熱収支の変化で海洋表層に熱を大きく取り込んだ状態が持続する事で発生する。従って、このような海洋熱波の物理プロセスを明らかにする一つの方法として、対象である海域における表層混合層の熱収支の計算を行うことが良く行われる。図3に、ある海域での熱収支に寄与する物理過程を示した。水平的な移流による熱の輸送、大気/海洋間の熱フラックス、水平及び鉛直方向での混合、そして混合層の下部からのより深層の水の取り込みなどが収支を決める (Oliver, et al. 2021)。この中で大気/海洋間の熱フラックスは、さらに乱流による潜熱や顕熱での海洋と大気間の熱フラックスと、太陽からの

短波放射熱による大気から海洋への熱フラックスと長波によるその逆方向へのフラックスがある。なお、長期的な視点からは海洋混合層の厚みの季節的な変化も海洋熱波の強度に関係する。これは、冬季の混合層の厚さが通年よりも薄くなった場合、夏季により少ない熱供給で混合層の水温上昇が生じるからである。このような現象は、海洋熱波への海洋側の準備と呼ばれ、同じ海域での数年に亘る海洋熱波の発生の1つの要因となっている (Holbrook, et al. 2020)。

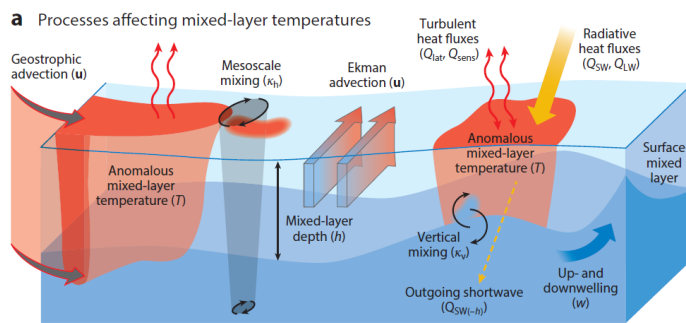


図3. 海洋表層の混合層の熱収支に関する物理プロセスの概要 (Oliver, et al. 2021)

Holbrook, et al. (2020) は、これまでの11の主要な海洋熱波の成因を主にブロッキング高気圧などの大気側でのプロセスが支配した事例、エルニーニョ現象などの大気/海洋の相互作用による場合、西岸境界流などの強化など海洋側でのプロセスが主導した場合に分けて解析しているが、大気側が主導した事例が5回、大気/海洋の相互作用による事例が4回、境界流の強化による事例が2回としている。この内、熱帯域以外での多くの大規模な海洋熱波は、海洋上での長期化した高気圧システム（ブロッキング高気圧）とその結果としての大気/海洋との相互作用が関係している。このような大気状態の元では、雲の発生が抑制され日射量が増大し表面での風力も弱くなるので、暑く乾燥した天候が生じる。これらの条件が重なると、海洋での顕熱及び潜熱の損失が減少し、太陽放射による加熱が増加することで海洋表面の水温が上昇することになる

(Holbrook, et al. 2020)。最近でのこのような事例は、2015 - 2016年の南東熱帯インド洋からサンゴ海にかけて、2015年の東シナ海、2017年の南西大西洋沿岸、2017年のペルー沿岸沖などがある。これらの場合は、異常に高い海水温は異常に高い大気から海洋への熱フラックスと関係している。

海側の要因が大きい海洋熱波としては、2001年の南大西洋のAngola Benguela湧昇システムや、2011年の西オーストラリア沿岸、2015 - 2016年でのタスマン海、2016年の日本の黒潮続流域 (Miyama, et al. 2021) などのように、海流による低緯度から高緯度への熱輸送が異常に高くなった場合がある。また、幾つかの要因が組み合わさることで大規模な海洋熱波に発達した例として、2014 - 2016年の大平洋東岸のものがある。この場合は、赤道域と非赤道域でのテレコミュニケーションも働いたと考えられている (Tseng, et al. 2017)。さらに、北極の海氷が大規模に後退したことが要因の1つと考えられる、2016年のアラスカ湾やベーリング海での海洋熱波もある。このように、海洋熱波の要因としては、地球の陸域、大気、海洋、雪氷圏を跨った場合

もあると考えられる。

これまでの文献調査と衛星データ解析で明らかになったのは、海洋熱波の規模や、頻度、期間は全海洋の中で不均一な分布をしている事である（図4）。つまり、大太平洋の赤道域の冷水域を除くと最も強い海洋熱波はガルフストリームやその続流域のような境界流と基本的には関係している。従って、強い海洋熱波が高頻度で生じる可能性のある世界でのホットスポットは5つの西岸境界流とその続流域、中央・東部熱帯太平洋域、東部境界流領域などである。また、東部熱帯太平洋ではエルニーニョ現象・南方振動（ENSO）による変動が個々の海洋熱波を強化し長期化させていることが知られている。これらの海域では、不安定な沿岸流やメゾスケールの渦攪乱が表層での高温を低緯度から極に向かっての移流するプロセスが生じやすい。さらにもう1つのホットスポットは大気場での強制力による異常な大気/海洋間の熱フラックスが生じやすい海域である（Oliver, et al. 2021）。また、文献調査などで分かった事として、極めて大きな表面水温の局所的な高温化現象が生じているにも関わらず、黒潮などの西岸境界流の領域での海洋熱波に関する研究が少ないことは驚きであると記述されている。それとは対照的に東岸境界流に関しては、海洋熱波に関する多くの研究が報告されている（Holbrook, et al. 2019）。なお、黒潮の続流域においては2016年の海洋熱波についての報告があることは既に述べた（Miyama, et al. 2021）。さらに最近気象庁は三陸沖の水深300mでの水温が平年よりも10℃も高くなっている海域があり、黒潮がより北に向かって流れている事を反映していると報告している。

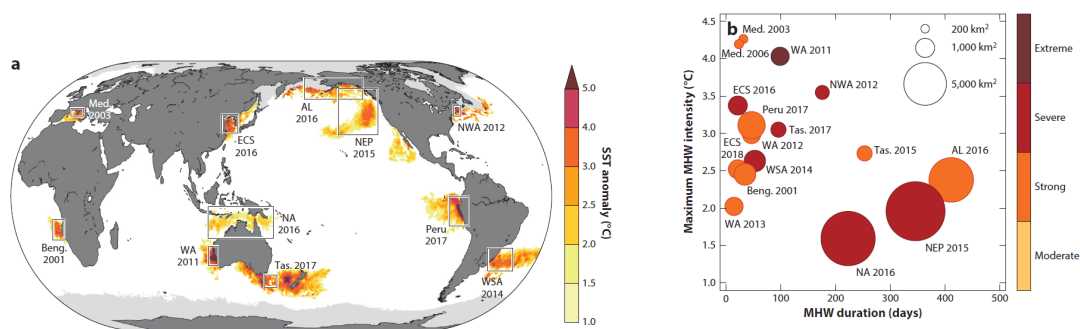


図4 主なこれまでの海洋熱波：(左) 四角で囲まれた各海域での時系列データを平均した海洋熱波のピーク時における1℃以上の高温高温の海水面温度、(右) 海洋熱波の強さ（y軸）とその継続期間（x軸）で、丸の色はHobday et al. (2018) による海洋熱波の強さ（カテゴリー）を表し、また大きさはカテゴリー2に達した時の海域面積である（Oliver, et al., 2021）

サンゴ礁などの浅海域での地域的な物理的特性と海洋熱波に関する考察も行われている。例えば、Fordyce, et al. (2019)はサンゴ礁海域で特に表面水温が上昇する物理的な要因として、良い天候と無風状態の持続が大気側の条件であるとしている。これは表面水温の冷却化には水の蒸発による冷却（潜熱）が大きく寄与しており、2001/2002年のグレートバリアリーフにおけるサンゴの白化には、この無風状態による蒸散の低下とそれに伴う高温化が大きな原因であったと考え

ている。一方、海洋側においても無風条件は風波による表層の上下混合が妨げられ、表層水の高温化が維持される。また、無風環境では、海洋の平滑な海水表面は粘性のある境界層を形成し、鉛直方向での熱輸送が低下する事が生じる。これは気温低下が生じる夜間における水中から大気への熱輸送も抑制することになる。

一方、サンゴ礁では潮汐によるフラッシュ現象は水温低下に大きく寄与し、高水温をリセットさせる能力を持つ場合もある。このように、潮汐がサンゴ礁の水温にどのように寄与しているかは、サンゴ礁の海底地形と水深分布および潮汐の大きさに依存している。このように幾つかの要因はサンゴ礁レベルでの広がりを持っており、さらにそれよりも小さい規模の現象もあることが分かる。従って、衛星データからの海洋熱波とサンゴ礁のそれぞれのサンゴ礁での相違はこのような非生物的な環境場の違いで生じる事が多い。

3. 海洋熱波による海洋生態系への影響—これまでの経験から—

Smith, et al. (2021)は、これまでの各海域における海洋熱波とその海域での生態系サービスや関連する経済活動へのインパクトの研究事例をまとめ全球的な視点でその評価を行った(図5)。その結果、海洋熱波の生態系への影響で有害藻類のブルーム、種組成の変化、大量死の現象、生態系の再構成などを含めたさまざまな人間活動に負の影響を与えた事例には、少なくとも 34 回の海洋熱波が該当したと述べている。その中で漁業やサンゴ礁、海草藻場、海藻藻場などの浅海生態系の基盤生物群集の亡失は特に多く目立っている。その一方で、このような極端な高温化の現象への海洋生物群集の応答は、短期間ではあるが例えばスポーツフィッシングの対象魚を含めた特定魚種の増加での遊漁客や漁獲収益が増えることで人間と海洋との相互関係を強める結果も生じている。しかし、1つの海洋熱波による経済的なロスに直接的なものでUS 弗 800 万を超え、間接的なロスはUS 弗 3.1 億を超すと推定している(Smith, et al. 2021)。

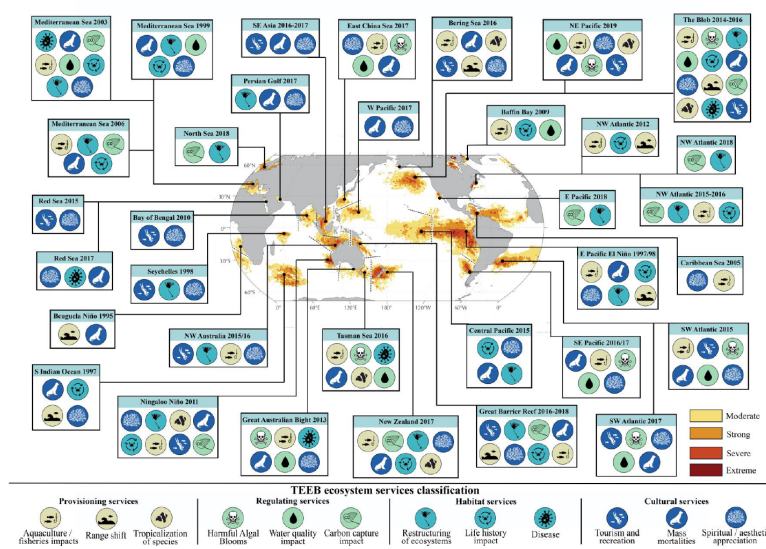


図5：各海域における34回の海洋熱波とその海域での様々な生態系サービスや関連する経済活動へのインパクトの事例のまとめ (Smith, et al. 2021)。

上記のように海洋熱波海洋生態系に対して幅広いインパクトを与え、それを攪乱する強力な作用を持っているが、以下にこれまで研究された被害を受けた海域での海洋熱波と生態系や人間活動への影響を具体的にまとめる。ここでは特に生態系の基盤を構成する機能を持つ、海藻藻場、海草藻場、サンゴ礁に関して特に注目するが、外洋域での水産業への影響についても具体的な事例を挙げて検討する。

3-1 浅海生態系の基盤を構成する海藻藻場、海草藻場、サンゴ礁への影響

図6にここで取り上げる海藻藻場、海草藻場、サンゴ礁の写真を示した。いずれも浅海域で三次元的な構造を作ることによって、多くの生物群集の餌場や住処などの生活の場を提供している。従って、海洋熱波でこのような三次元的な構造が損失するとその影響は大きい。

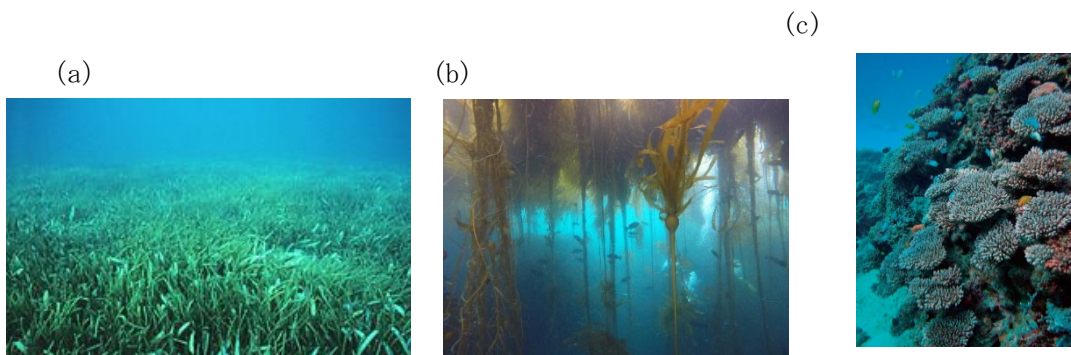


図6 (a)海草群落 (Wikipedia) , (b)北カリフォルニアのブルケルプ海中林 (Bull kelp. Steve Lonhart, NOAA MBNMS.)、(c)沖縄の造礁サンゴ礁 (大森・岩尾、2014)。

3-1-1 海草藻場への海洋熱波の影響

海草は根茎を発達させ花を咲かせる単子葉の種子植物であり、陸上の植物が今から 1 億年 - 6600 万年前の白亜紀後期に、進化の過程で耐塩性などの性質を獲得し海洋の浅海に進出したものと考えられている (Larkum, et al. 2018)。比較的波浪が穏やかな砂質や泥質の堆積物環境に適応しているため、同じような浅海域を生息域とするが岩などの固着基盤を必要とする海藻とはすみ分けている。熱帯から寒帯の浅海域に約 50 - 60 種が広がっているが、寒帯/温帯では種数は少なく、且つ 1 種だけの群落を作る事が多いのに対して、熱帯域では種数が多くさらに数種が混生して群落を作る場合が多い。海草藻場は魚類など多くの海洋生物の産卵場や稚仔魚などの生育場となっている事が多く浅海域生態系の基盤生物とされている。

このように世界中の浅海域に生息する海草は、その温度至適範囲もあつて上記に述べたように海域による種組成に異なりがあり、特に夏の水温は重要な環境要因となっている。従って海洋熱波の発生によりその負の影響を大きく受けることになる。また、その影響は海草だけでなく海草の生態系サービスに依存する多くの生物群集に及ぶ。例えば、西部地中海でも海洋熱波により主要種である *Posidonia oceanica* の株の枯死がその再生率を上回ったことが報告されている

(Marba & Duarte, 2010)。

ここでは、良く調査された事例として 2011 年に西オーストラリア沿岸で生じた海洋熱波による海草藻場への影響とそれに伴う生態系の変化と漁業への影響について紹介する (Kendrick, et al. 2019)。この海洋熱波はオーストラリア西岸を極方向に向かって流れる境界流である Leeuwin 海流が、赤道域で強まったラニーニャ現象と関連したテレコネクションの影響を受けて極端に流れが強まって生じたものである (Feng, et al. 2013)。オーストラリア西岸の南緯 25 度付近にある温帯から熱帯の移行帯に位置するシャーク湾では、約 4000 平方 km の広さを持つ 13 種の温帯性・熱帯性の海草で構成される海草藻場が広がっていた (Kendrick, et al. 2019)。その内、温帯性で大型の *Amphibolis antarctica* と *Posidonia australis* が主要種で前者が藻場面積の 90% 弱を占め、残りの 5% を *Posidonia australis* と熱帯性の小型海草の混生藻場が分けていた。

2011 年の海洋熱波によりこのシャーク湾では夏季の 2 ヶ月間に亘って、表面水温が通常よりも 4℃ 近くも上昇した。持続した高温の影響と、陸域での降水量の増加による流出土砂による浅海域の濁りが負荷となり、葉枯れから始まって根茎の枯死が湾内の海草の 60 - 80% まで生じた。その後、これら主要種の減少が継続する一方でその空間を使って一部の海域では、*Halodule uninervis* などの成長の早い小型の熱帯性海草がその領域を広げた。これらの熱帯種は攪乱には弱い、早い根茎の伸長や、埋土種子の存在などにより回復の進行が早かった (Sherman et al. 2018)。一方、海洋熱波の前にはシャーク湾で主要な種であった二種は、いずれも根茎の伸長が遅くまた埋土種子を欠く性質のため環境の攪乱に対し回復力は遅いと考えられる。また、*Amphibolis antarctica* は、根茎に炭水化物を貯留する能力が低く、高い呼吸活性を持つため、葉を有効に使って十分な光合成能力が維持することで分布を広げる生活戦略を持っている (Carruthers & Walker, 1997)。従って、高水温による呼吸の増加と、濁度による光合成の低下が合わさる環境変動は、*Amphibolis antarctica* においては致命的であった。一方、*Posidonia australis* は、2016 年には回復を見せ、2018 年には元の密度に戻っていた。また、後で述べるようにこれらの一次生産者の変化は、ウミガメやジュゴンなどの消費者の餌などにも影響を与えた事もその現存量の調査から分かった。

これらの研究からシャーク湾の海草藻場では複数の環境負荷が合わさることで、生態系がその応答可能な範囲を超えるような負荷を受け、生態系としての極端な応答が生じていた事が示された。また、海洋熱波のように極端な気候現象が海洋生態系の動態をどのように変化させるかを理解し予測しようとする場合には、直接的な高温や濁度など非生物的な影響と、間接的な種間の競争などの生物的な影響の両方を統合的に考えることが重要であることも分かる (Kendrick, et al. 2019)。

最後にシャーク湾における海草藻場群落の大きな消失とその後の遷移に伴う、藻場を生活の場とする生物群集の変動を調べた結果を図 7 に示す (Kendrick, et al. 2019)。ここで示したのは、海洋熱波の前後 18 年間に亘る現存量調査によるもので、対象はサメ類、ウミヘビ類、イルカ、ジュゴン、アオウミガメ、アカウミガメ、鵜の一種の 7 種類である。この中で大規模な海草藻場の消失が生じたにも関わらず、いわゆるジェネラリストであるサメの一種やアカウミガメは殆ど影

響を受けなかった。一方、他の生物群集はその依存する食物の欠乏や住処の消失で明らかに現存量を減らした。また、海草藻場での漁業対象についてはエビを除いてホタテガイやカニ漁は数年にわたって出来なくなるなど、海草藻場の消失はこれに依存するいくつかの栄養段階の生物群集にも大きな影響を与えていることがわかった (Nowicki, et al. 2019)

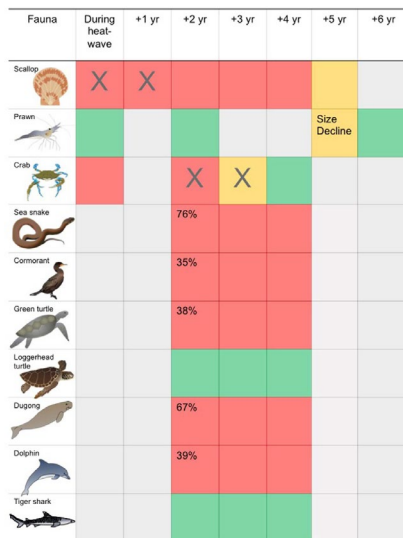


図7 シャーク湾の海草藻場に付随した生物群集の2011年のMHW以前とそれ以後の一般的な時系列での変動。赤：群集の減少、黄色：何だかの変化、緑：群集に変化なし、茶色：データなし、X：漁業の閉鎖（詳細はNowicki, et al., 2019）。

3-1-2 海藻藻場への海洋熱波の影響

コンブ場のような大型の海藻藻場は、北カリフォルニア沿岸のブルケルプのように数10mの規模で海中林を作り、多くの生物群集がそれに依存している生産性の極めて高い生態系を構成している（図5b）。海藻は海洋に生育する体が大型の緑藻、褐藻、紅藻の一般名である。その分類は主に光合成色素の組成の違いによるが、その違いにより光合成に利用出来る太陽光の波長が異なることから、緑藻はより浅海で紅藻はより深部に、またその中間に褐藻が占め生育する水深が異なってくる。先の海草と海藻との違いは、海藻は花を咲かせて種子で増殖する顕花植物ではないこと、また、根や茎、葉などの形態がはっきりせず、海底の岩などの基盤に付着器（仮根）で付いて固定生活をおくるがこれに栄養吸収の能力は無く、栄養塩の吸収は水中から行っている。海藻の分布は、岩礁域であれば高緯度から熱帯域に及ぶが、海中林と呼ばれる大型海藻の藻場は温帯から寒帯に多いことが知られている。ここでは大型のコンブ場などの生態系における海洋熱波が、どのような生態系の変化を生じさせるかについて、二つの海域での具体的な事例を示すことにする。

（1）カリフォルニア沿岸（2014年）でのコンブ群落の被害

2013年に始まった赤道域と温帯域でのテレコミュニケーションの影響を受けた東部北太平洋上で、持続した高気圧帯が発達しそれによる海洋熱波が沖合で発生した。この高温帯が2014年には沿岸にまで接近すると、カリフォルニア沿岸での寒流である北カリフォルニア海流を弱体化させ、栄養塩の乏しい通常より2.5℃も高い暖水がこの沿岸域に236日も留まった(Rogers-Bennett &

Catton, 2019)。このような長期に亘った高温現象がコンブの成長期に対して大きな負荷を与えた。また、この海域では2013年に生じたヒトデの病害によってヒトデの大量死が生じている。中でもコンブ林生態系において、ウニ類の重要な摂餌者である、ヒトデの *Pycnopodia helianthoides* がこの病害でほぼ全滅し、2014年以降も回復しなかった。その一方で、2013年より以前には、この海域では目立った存在では無かったコンブの主要な摂餌者であるムラサキウニ (*Strongylocentrotus purpuratus*) が急激に増え始め、海洋熱波の後の2015年にはその現存量は60倍にも増えた(図8)。

以上の経過は、海洋熱波と言う非生物的な環境変動に、コンブの摂餌者の増加という生物的要因が合わさることで、沿岸域の350kmに範囲に亘ってこのコンブ群落は90%も減少し、大規模なコンブ林生態系の崩壊が生じた。さらに、この浅海生態系は水産的には重要なアワビの豊かな現存量を維持していたが、2017年にはコンブ林生態系の縮小により80%ものアワビの大量死が生じ、その結果2018年には約\$44Mと推定されるアワビ漁が出来なくなっている。なお、2014年以降で見られたコンブ場の衰退とウニ群集の大繁殖の原因としてMHWとヒトデの病害による減少のどちらが主たる原因であったかはまだはっきりしない(Rogers-Bennett & Catton, 2019)。

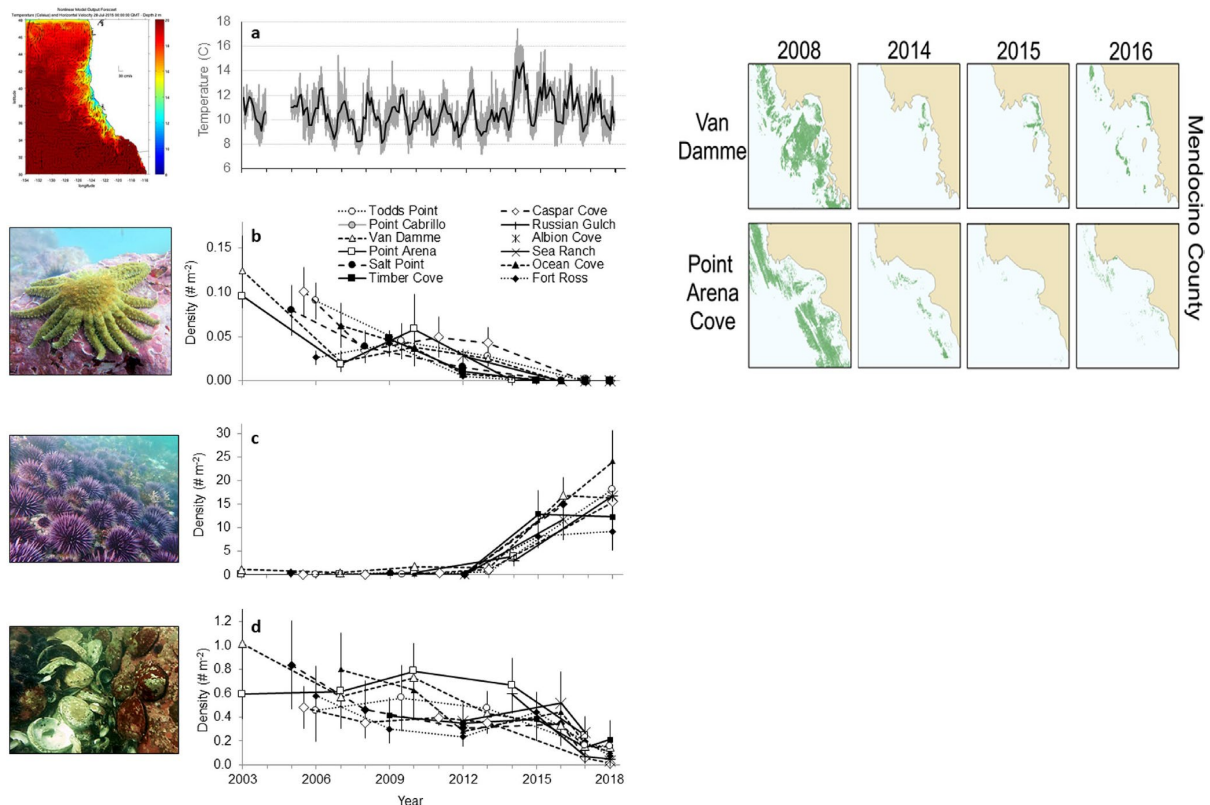


図8 右図は2014/15年の北部カリフォルニアでの海洋熱波によるコンブ場(緑色の部分)の消失の推移、左図は生態系へのインパクトで、aは平均的な水温変動、bは各海藻場におけるヒトデ (*Pycnopodia helianthoides*)、cはムラサキウニ (*Strongylocentrotus purpuratus*)、dはアワビのそれぞれの棲息密度の推移を示す (Rogers-Bennett & Catton, 2019)。

(2) ニュージーランド南島におけるコンブ場の消失

次に2017/18年の夏季にニュージーランド南島で生じた海洋熱波による、この海域での固有種である大型褐藻 (Southern bull kelp) の一種 (*Durvillaea. Poha*) の被害についての紹介する (Thomsen, et al. 2019)。この*D. Poha*は潮間帯の下部に分布するこの沿岸域では代表的な褐藻類であり、沿岸域での生物多様性および生態系サービスの中心であった。ここでの海洋熱波の成因はニュージーランド周辺において高気圧性循環が長期に定着し高気圧のブロッキング現象が生じたことで、大気から海洋への熱輸送が促進され海洋表層での成層化が進み、タスマン海の表面水温が高くなったことによる (Salinger, et al. 2019)。

その結果、2017/18年の夏季にはこの海域での衛星観測が始まって以来の海洋熱波が生じた。また、大気温度も高くなり、平穏な海況と相まって日中の干潮時の藻類への乾燥ストレスが大きい条件となった。*D. Poha*の海洋熱波による衰退はリーフの違いにより変化した、表面水温が23℃を、また気温が30℃を超え、干潮時の露出が3時間に及んだ南緯44度に位置するPile Bayではこの褐藻の100%の消失が生じた。このPile Bayではその消失の後翌年には成長の早い*Undaria pinnatifida* (ワカメ) が高密度で侵入し、また、他の侵入的なアオサなどがその後を埋めた。これに伴ってこの場のイガイの現存量も10%まで低下した。

過去の2010/2011年でのオーストラリア西岸での海洋熱波の例から、潮下帯の海藻はその分布の北限では高水温の影響で消失したことが分かっている。しかし、今回はその分布の北限から200kmも南に位置していたPile Bayで消失が生じたが、これはこの湾が内湾であり水温が上昇しやすい環境であったことが一つの原因となっている。低潮時の長時間の干出に対しこの褐藻の耐性が弱く、さらに平穏な環境が持続ししぶき等による乾燥の緩和も低かった。従って、このPile Bayにおける*D. Poha*は、生理生態的な限界に近い状態で生息していたと考えられる。なお、この沿岸での固有種である*D. Poha*は現在でもその分布域は狭いのでその存続が危惧されている。

以上二つの海域での海洋熱波による海藻藻場の衰退や消失の例を示したが、Straub et al. (2019)は、海洋熱波と海藻藻場に関係する58ケースでの海藻の抵抗性や栄養体の枯死、現存量の変化、地点から地域におよぶ消滅、多種の侵入などの観察の結果をまとめている。海洋熱波による被害の報告に関してはキャノピーを作るサルガッスムや有節サンゴ藻などに比べると、より多くの報告がキャノピーを作るコンブや葉状やフィラメント上の芝生のような広がりを持った海藻の方でなされている。また、海洋熱波の後本来のキャノピーを作るコンブやサルガッスムなどが減少し、一方で侵入種とされる芝生のような広がりを持った海藻が広がるという報告も一般的である。また、地域的なコンブ場やサルガッスムが完全に消失したケースも4か所ほど報告されている。これらの結果から全体を通じて注目すべきは次の二点としている。

・海藻藻場の衰退は海洋熱波のような高温での影響だけでなく、海流の変化、海水の濁度や、栄養塩の変化、潮間帯では乾燥度の違いなどの非生物的な要因や、摂餌動物の動態などの生物要因まで同時に考える必要がある。

・コンブのような大型の持続性の長い海藻群落から小さいより短期性の海藻群落への置き換わりが今後進行することで、三次元的な藻場の構造が減少し、生態系サービスが損なわれる事が生じる可能性が大きい。

3-1-3 海洋熱波のサンゴ礁への影響

造礁サンゴが形成するサンゴ礁は熱帯・亜熱帯の浅海域では重要な生態系を構成している。すなわち貧栄養の周辺海域において造礁サンゴは、共生藻類を体内に取り込み光合成と窒素・リンなどの生体構成成分を共生内で循環させ、同時に石灰化を進めて三次元構造を作り出す機能を担っている。しかし、これまでに示したように大規模な海洋熱波は熱帯・亜熱帯の沿岸域を含んで発生している事が多いため、これらの海域での重要な基盤生態系であるサンゴ礁にも大きな影響が生じている。例えば、オーストラリアのグレートバリアリーフ（GBR）のサンゴ礁では、海水温の上昇により 1998、2002、2015 - 2017 年に大規模なサンゴの白化が見られた（Hughes, et al. 2017）。なお、最近の大規模な白化ではこの 2300km にも及ぶサンゴ礁の約 2/3 が被害を受けている。

サンゴ礁に関しては海洋熱波の概念が確立する以前から高温ストレスによる白化現象が注目されており、2000年にアメリカのNOAAがCoral Reef Watch（CRW）Programをスタートさせている（Liu, et al. 2003）。これは夜間の衛星での表面水温データ等を用いて全球でのSSTをモニターするものである。そこでは白化をもたらす水温上昇の指標としてDHW(the degree heating week)が提案された。これは夏季の3ヵ月間における異常な高温値（これは、気候学的にその海域で最も暑い月における月平均水温の最大値を1℃以上越す水温）をHotspotと呼びその3ヵ月間の積積値（単位は℃-Weeks）を使っている。従って、水温が1℃高い状態が4週間続いても、2℃高い状態が2週間続いてもDHWは4℃-Weeksとなる。これまでの経験からDHWが4℃-Weeksではサンゴ礁は緩やかな白化を示すが、これが8℃-Weeksでは、白化の程度は厳しくまたより広範囲となることが示されている。

このようにサンゴ礁生態系では、その海域での異常高温とサンゴの白化などの被害との関係が以前から認識され、その水温モニタリングに基づく警報も行われていたことは注目される。一方、このDHWの限界も指摘されている（Fordyce, et al. 2019）。それは、夏季の3ヵ月を外れた時期における高水温が生じた時（Keppel Island, GBR, 2006）や当初の50kmメッシュの衛星観測では海域的にはっきり高温水域の持続が確認できなかった場合などがある。なお、現在では衛星データは5kmメッシュのものが使用されて改善されている（Liu, et al. 2018）。

高温によるサンゴ礁の被害は共生藻類との共生関係が壊れる白化現象が良く知られている。この場合でも条件が良くなると、また共生藻類が戻って来ることも知られており、白化はサンゴが高温や強光などの環境ストレスにより共生藻類との共生関係において不利な条件になった時の適応現象と見なす場合もある。しかしその一方で、海洋熱波での急激な高温状態が生じると、共生藻類の消失と共にサンゴ本体の細胞が急激なストレスによるアポトーシス（細胞死）を起こして死滅し、その後のバイオフィルムの繁茂によるサンゴ骨格の劣化が生じる事が 2016 年の GBR のサ

ンゴ礁で報告された（図9：Leggat, et al. 2019）。この時 GBR のサンゴ礁の 31%は、DHWs の指標で 8°Cweeks の状態であった。このサンゴ細胞の死滅の後数日後には生成されるバイオフィルムの初期の主な構成者は、サンゴの共生藻類の 1 つとして知られる微細緑藻の *Ostreobium spp.* と藍藻類であった。*Ostreobium spp.* はサンゴが白化することで急速な増殖を示し、さらにサンゴ骨格を構成する炭酸カルシウムの溶解を促進していることも分かった。これらのデータは海洋熱波によるサンゴ礁の衰退が、サンゴ骨格の三次元構造の劣化と言う白化からの回復がより困難な状態に移行する場合がある事を示している。

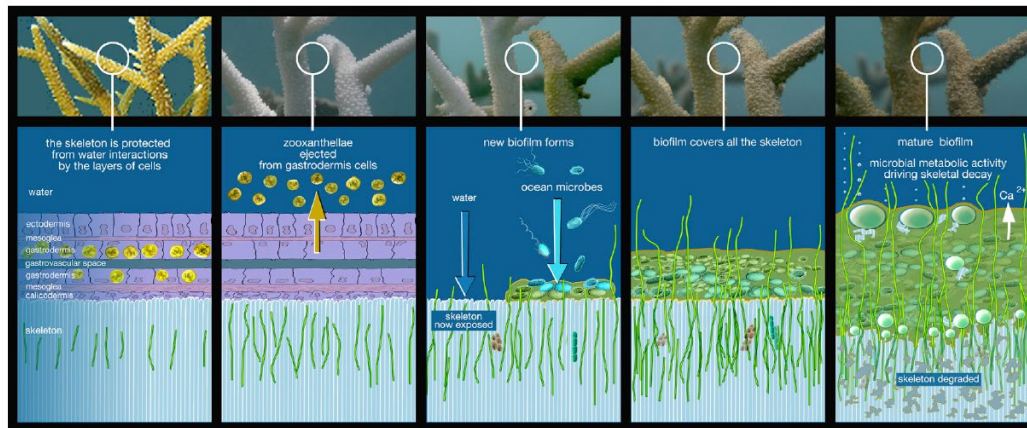


図9 海洋熱波で白化した後のサンゴの模式的な溶解過程。

左から健康なサンゴから共生藻類が抜けて白化し、サンゴ虫が死滅するとサンゴ骨格の上にバイオフィルムが広がって骨格が劣化していく（Leggat, et al. 2019）

サンゴ礁の白化と地球温暖化による海洋熱波の増加との関係が強く懸念されており、従って地球温暖化を制御出来ればサンゴ礁の白化による劣化も抑えられると言う考えもあり得る。しかし、これまでにサンゴ礁の劣化には、海域の富栄養化や懸濁物の流入などの地域性のある要因も多い事が指摘されてきた。最近、サンゴ礁を海洋熱波が襲った後、そのサンゴ礁の状況にどのような非生物学的あるいは生物学的なローカルな要因が働いているかを世界での200事例以上で調べた結果が報告されている（Donovan, et al. 2021）。それによると、白化からの回復過程において非生物学的な要因として水中の濁りや波浪がその回復を抑制しており、これらも制御しなければサンゴ礁の衰退は食い止めることが出来ないとしている。

また、サンゴ礁への海洋熱波による熱ストレスと各サンゴ礁での海藻やウニなどの生物的要因との関係において、海藻群落の被度が大きいサンゴ礁では、海洋熱波の後のサンゴの被度の回復が抑制されている事が示された。つまり同じような強さの海洋熱波の後の経過でも、より海藻被度が高い海域ではサンゴの枯死が10倍も高まっている。その逆に海藻の被度が低いサンゴ礁では、海洋熱波がより強くても被害はそれほどには大きくならないことも分かってきた。このように世界的に見ても熱ストレスの増加とともに、海藻類の繁殖がサンゴ礁の衰退に大きく働いているようである。また、ウニに関してはこれまでの幾つかの論文で、多くのサンゴ礁でウニの現存

量が増加する事で海藻の繁茂の抑制につながり、サンゴの復活にも寄与する場合があると報告されている。一方、サンゴ礁によってウニの現存量は4桁も異なり、ウニが非常に多いサンゴ礁ではウニの存在がサンゴ礁の白化からの回復にネガティブに働く場合も報告されている。

3-2 海洋熱波の水産業への影響

既に述べたように海洋熱波と言う表層海水温の海域的な急激な上昇が無くても、地球温暖化により吸収した熱の90%は海洋に貯蓄されており、その結果、世界の海洋の表面海水温は明らかに上昇している。これを受けて遊泳力のある魚類を初めとして多くの海洋生物が、極方向への移動を行っている。一方で、海洋熱波による海洋環境の急激な変化ははっきりした水産資源の棄損をもたらす場合が多い。なお、浅海域でのコンブ場におけるアワビ漁や海草藻場でのホタテ貝やカニ漁の被害については既に記述しているので、ここでは沿岸から外洋での漁業についての事例を紹介する。

2013年から2015年にかけてアラスカ湾からバハカリフォルニアまでの広い海域で海洋熱波（The Blob）が生じた事は既に紹介したが、この時は長期にわたる高温状態が継続したため、水産業にも多くの被害が出た。その一つが異常高水温に伴う沿岸域での有害藻類（HAB）の長期にわたる発生である（Cavole, et al. 2016）。記録破りの有害藻類（HAB）の発生が2015年にアメリカ西海岸の広い海域で生じた。主要なHABは珪藻の*Pseudo-nitzschia*の仲間であったが、この珪藻は神経毒であるDomoic acidを生成し、この神経毒が食物鎖で濃縮されて海鳥や海産哺乳類の死因となった。また、貝毒として人間にも被害を与えた。このHABは北東太平洋では一般的であり、通常は夏の終わりから秋にかけて数週間程度ブルームが続くが、2015年には5月から10月まで毒性の強いこの珪藻のブルームが継続した。

この神経毒を持つHABの発生で、商業漁業と遊漁漁業の両方ともが閉鎖され、数百万弗の経済的な損失が生じた。特にワシントン州からカリフォルニア州にかけてのダンジネスカニ漁は2015 - 2016年の漁の中止や延期で大きな打撃を受けた。2016年2月までの被害は48百万弗と推定される。さらに、このHABにより、アメリカ北西海岸でのハマグリ取りが禁止され、これはこれを楽しむ行楽客の減少を招くなど、経済的には22百万弗の被害と推定された。このHABにより、他の種類のカニ漁などの漁業も2015年には停止されて被害が広がった。

さらにこの海洋熱波（The Blob）はアラスカ湾での水産有用魚種であるスケトウダラの漁獲量の激減にも大きく影響した。なお、スケトウダラはアメリカでは最大の漁業資源であり、年間1.4億Kgの漁獲量があり、これはアメリカでの重量当たりの漁獲量の1/3にも達する。海洋熱波の影響でベーリング海におけるスケトウダラの再生産がこの魚が好む冷水の脂肪を多く含むカイアシ類の減少でうまく行かなくなった。栄養価の高い餌が乏しいことで冬を越す再生産率が大きく低下したことが原因と考えられている（Cavole, et al. 2016）。このアラスカ湾でのスケトウダラの漁獲量の激減に関しては、稚魚期における餌の不足に加えて、産卵場近辺での海水の低塩分化により卵の浮力調整とその後の生存がうまく行かなかったことも要因の1つに挙げられている。その結果、2015年の秋におけるスケトウダラの当歳魚の資源量はこれまでの最低年の1/50になったと報告されて

いる(Rogers, et al. 2020)。図10は、Smith, et al. (2021)によってまとめられたアラスカ湾における海洋熱波 (The Blob) の海洋生態系に与えた影響を時系列で示したものであるが、スケトウダラの再生産の劇的な減少とともに、スケトウダラを餌としていたアメリカウミスズメなどの海鳥のこの年における飢えによる急激な死亡率の高さも示されている。

しかし、海洋熱波 (The Blob) の影響は経済的に悪い事ばかりでは無かったようである。例えば、西海岸沖では極めて高価な太平洋本マグロが、餌のツナクラブ (Tuna crab) の激増や海洋条件が良くなったことを反映してその分布範囲を広げた。その結果漁獲量が大きく増え、その一方で市場での価格は低下した。また、ホエールウォッチングの盛んなアメリカでは約年間1億ドルのこの市場があるが、この熱波は様々な種類のクジラを多くの西海岸にもたらし、この業界は大盛況であった (Cavole, et al. 2016)。

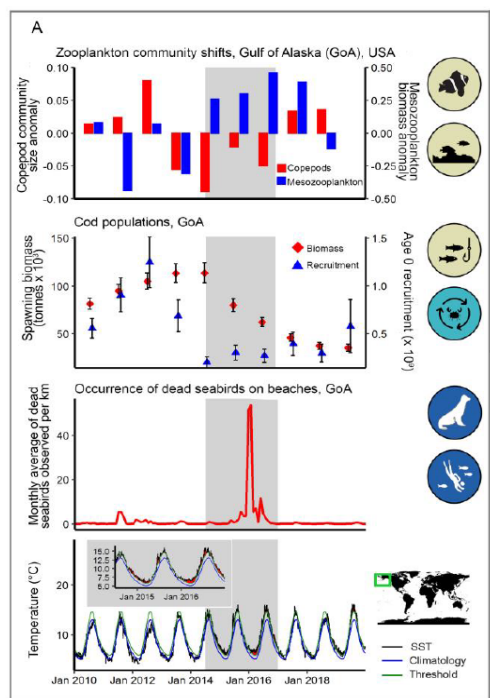


図10 北東太平洋における2014-2016年に生じた海洋熱波 (The Blob) による生態系を通じた影響：アラスカ湾における動物プランクトンの種組成が栄養価の高い種からそうでない種に変化し(上段)、稚魚期にそれを餌にするスケトウダラのゼロ歳魚の再生産が激減し(二段目)、さらに餌である魚の現存量の減少で、海鳥の多くが飢えて死亡した(三段目) (Smith, et al. 2021)。

なお、上記の北東太平洋での海洋熱波に関し、Cheung et al. (2020) は地球システムモデルを使って、海洋熱波に対する北東太平洋の漁業資源の応答のシミュレーションを行っている。モデルでの推定では、今回 (2013 - 2015 年) の北東太平洋の海洋熱波は、今後 21 世紀までに生じる温暖化によるゆっくりとした影響に比べて、水産資源に関する生物量の減少や魚資源の地理分布のシフトが少なくとも 4 倍以上生じたと考えられる。また、2050 年までにおいても、通常の温暖化による水産業への影響を推定した予測に比べて、海洋熱波がこれに加わる事で 2 倍のレベルの影響が現れると推定している。

次の事例はオーストラリアオーストラリアの南西沿岸(南緯22-35度)で長年漁獲対象とされてきたキス科のイエローフィンホワイティング (*Sillago schomburgkii*) への海洋熱波の影響で

ある。この魚は1950年以来、その資源量の多い海域はゆっくりと南に移動していたが、2010/2011年の海洋熱波の影響で資源量の急激な極方向への移動が生じ、その北端では急激に減少した (Smith, et al. 2021)。これに伴って、この魚の2010/2011年の年級における再生産も南の海域で異常に高くなり北側ではこれが少なかった。この魚の産卵は約20~26℃の海水温と関連しており、平年の水温は北部では一年の殆どがこの範囲であるが南部では夏の最盛期にわずかの時期のみである。一方、熱波の間沿岸の気温は平年より5℃までも上昇した。その結果、海洋熱波の影響で南北における産卵期間に大きな違いが生じ、各海域での在来魚の産卵成功率の変化が生じたことが、この魚の南北による分布の変化をもたらした大きな要因と考えられる。ここで見られたような大規模な魚種の移動は、この魚種を対象とする北部と南部での商業漁業とレクリエーション漁業にとって利害が大きく分かれる可能性がある。つまり、今後も海洋熱波がこの海域で頻繁に生じるようになると南部地域の漁業はこの魚の漁獲量の増加からの恩恵を受けると予想されるからである。

最後の事例はわが国の大太平洋沿岸での海洋熱波の報告である。この数十年にわたる全球的な海洋熱波の解析でも既に想定されていたが、最近、日本の大太平洋岸の親潮域で2010年から2016年まで夏季に海洋熱波が生じていたことが確認された (Miyama, et al. 2021)。この原因としては、西岸境界流である黒潮から生じた暖水塊が安定化したことで沿岸寄りの親潮の南下をせき止めて海水温上昇につながっていたと考えられている。ここは漁業において重要な海域であるが、北海道太平洋側でのブリの漁獲量が、2010年以降に温度が高くなって以降に上昇していることから、両者の関係が強く示唆されている (図1-1)。なお、2017、2018年と温度が平年並みに下がっているが、2019、2020年と再び暖水渦で水温が上昇しており。ブリの漁獲量も高止まりしたままとなっている。この海域では海洋熱波の起こりやすい状況が常態化している可能性があるとも考えられる。

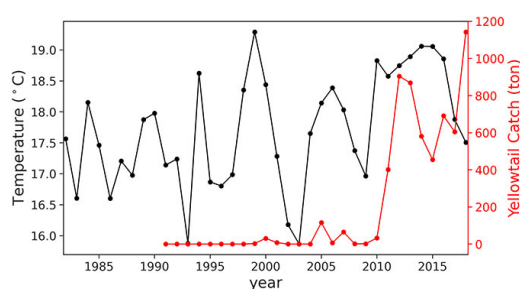


図1-1 北海道の南島沖の海域(143-147°E, 40-43°N)での平均した夏期(7~9月平均)海面水温の時系列(黒線; 左縦軸の℃)と北海道南東部(日高・十勝・釧路)のブリ漁獲量の時系列(赤線; 右縦軸のトン) (Miyama, et al., 2021)。

なお、最近海洋熱波の影響は北アメリカ、ヨーロッパの陸棚域での底引き網漁業のデータを解析した結果、底魚群集に関してははっきりした関係が見られなかったことが報告されている (Fredston, et al. 2023)。この論文では1990年の初頭から約25年間における、北アメリカ、ヨーロッパの亜熱帯から極域までの陸棚域での水深が18 - 450mまでの82000回にも及ぶ底引き網でえられた魚種や漁獲量のデータとこの間の248回に及ぶ海洋熱波との関係を調べた。その結

果、多くの場合海洋熱波の影響はあまり無く、その違いは自然やサンプリングによる変動の幅を超えるものでは無かった。さらに、海洋熱波はこれらの生態系における、より熱帯系の魚種の増加や、冷水指向の魚種の減少などと常に連動しているものでは無かったとしている。海洋熱波はここで調査した海底においては一時的なイベントであり、それが過ぎると生態系はまた元の状態に戻る事が出来るようで、まだ、復元が不可能な条件にはなっていないと著者らは判断している。

以上三つの事例を中心に海洋熱波と漁業との関係を紹介したが、共通して考えられることを以下にまとめる。

(1) 海洋熱波の水産業への影響は、様々な形で現れることである。アメリカ西海岸における長期のHABの発生は食物連鎖を通じてカニやハマグリなどの毒性が高まり捕獲が禁止された。また、アラスカ湾でのスケトウダラの漁獲量が激減したのは、餌である動物プランクトンの減少や産卵地での淡水の流入など複数の要因が考えられており、これらは海洋熱波の間接的な影響と言える。

(2) 水産業は経済活動であり、海洋熱波により大規模な魚種の移動が生じると、それによって被害を受ける所も、漁獲量が上がって潤う所も出ることになる。Cavole, et al. (2016) の海洋熱波 (The Blob) による水産被害を紹介した論文のタイトルに “Winners, losers” という言葉が入っていたように、高水温化による急激な魚種の移動や交代によって、一時的にはある海域での漁業が盛んになり、勝者を生む場合もある。

(3) 海洋熱波は、長い目で見れば2100年での海洋環境を先取りしていると言う事も出来る。また、海洋熱波が生じやすい海域があり、そこでは今後地球温暖化に伴って海洋熱波の生じる頻度は高くなると予想されている。従って、特に大きな設備投資を伴う大規模養殖などにおける適地の選択などに対するより詳細な海洋熱波の予測などの必要性は高い。

4 今後の海洋熱波に関する予測と海洋生態系への影響

人間活動の結果としての地球温暖化による気候変化 (Climate Change) と、自然現象としての気候変動 (Climate Variability) はそこに働くメカニズムは別々であっても、両者が重なり合っていてここで問題としている海面水温の変動に影響している。この気候変動は多くの場合気候モードと言った特定の空間パターンを持つ物理現象として理解され、既に示したように海洋熱波は気候モードと密接に関連する。比較的短期の現象である赤道海域での ENSO 現象などは、その解析が進みメカニズムの理解と共に、ある程度の予測も可能となった。一方、より長期の現象である北太平洋十年振動・熱帯太平洋数十年振動については、観測データが利用できる期間内にそれらの現象が生起する回数が少ないために、未だそのメカニズムについて結論は得られていないとされている (石井雅男・見延庄士郎, 2021)。従って、海洋熱波の予測には将来の社会経済シナリオの違いを反映した温暖化による気候変化と共に、様々な時間スケールの気候モードの理解による気候変動の予測の両方が必要であり、まだ、不確実性の幅は小さくない。

IPCC では気候モデル CIMIP5/CIMP6 を使って、将来における海洋熱波の頻度や海域の特定などが予測されている (Collins, et al. 2019; Fox-Kemper, et al. 2021)。それによると温暖化が良

く制御された SSPI-2.6 の条件下で、1995 - 2014 年に比べて 2081 - 2100 年における海洋熱波は約 4 倍（2 - 9 回）の頻度で生じ、さらに SSP5-8.5 の条件下では 8 倍（3 - 15 回）生じるとの予測している。また、その発生率は全海洋において均等では無く、西部熱帯太平洋域や北極海でより頻度高く生じる可能性が指摘されている。一方、中緯度域ではその増加は緩やかであり、南大洋では大きな増加は予測されていない。さらに SSP5-8.5 のシナリオでは赤道域や北極海、南緯 45 度の一部では、21 世紀には通年の海洋熱波の発生が予測されているが、SSP1-2.6 のシナリオではこれを避ける事が出来そうである（Oliver, et al. 2019; Plecha & Soares, 2020）。なお、現在の CMIP5 や CMIP6 での気候モデルの精度では、強力な海洋熱波に関しては捉えることが出来ているが、一方、これまでに生じた弱い長期に亘る海洋熱波に関してはその把握があまり良くないことも示されている。

このように IPCC の報告書では 21 世紀までの海洋熱波の発生頻度やその海域の解析を行っているが、その一方で既に示した海洋熱波がもたらす社会経済的な被害等を考えると、その短期的な予報も重要である。既に海面水温(SST)に関しては、1 年先までの予報がエルニーニョ/ENSO などの大規模な気候モードの状態を予測するために業務的に行われている（Barnston, et al. 2019）。また、標的を絞った SST の予測では、既に述べたように NOAA の Coral Reef Watch がサンゴの白化の予測を既に行っている。これは、5m 平方メッシュのグリッドでの SST の業務的な 4 ヶ月前からの予測を行っているもので、これに基づいて特定の海域におけるサンゴの白化の警報を出す事も行われている（Lui, et al. 2018）。さらに、短期の海洋熱波の予測に関してはこれまで幾つかの試みがある。例えば、海洋熱波の水産等への被害をこれまで多く受けたニュージーランドでは、政府により The Moana Project という主に水産業に対する海洋熱波の被害を削減するために、ニュージーランド沿岸での短期予測を行う事業が開始されている（Souza, et al. 2023）。これは気象予報と同様に 1 週間程度先までの海水温予測を行うものである。

このように海洋熱波については、主に表面水温の高温への異常値を基に定義されているので、その予測はある程度は可能と思われる。最近 Jacox, et al. (2022) は 1 ヶ月から 12 ヶ月前に海洋熱波の出現可能性の高さやその持続期間などを予測がある程度可能であると述べている。彼らは最新の 6 つの気候モデルをアンサンブルで評価して、まず過去 30 年間での全球の表面水温の観測値とモデルからの数値の比較を行い、モデルのパフォーマンスを検討している。その結果、1 - 12 ヶ月前に多くの場合予測が可能である事が示された（図 12）。しかし、その一方で海域の特性や季節またエルニーニョ現象などの気候モードにその予測の確信度は依存しているとしている。例えば、予測を始めた時に活発な ENSO 現象が生じている時には、海洋熱波の予測の精度は多くの海域で高くなっている。しかし、海洋熱波に大きな影響を及ぼす ENSO 現象が、地球温暖化の進展でどのように変わるかについては、それがより頻繁に強い強度で生じるのか、あるいは温暖化の進展で減衰していくのか議論が分かれており、ENSO 現象そのものが不確実性の原因になる可能性もある（Jacox, et al. 2022）。さらに彼らのモデルによる予測能力は海域に大きく依存しており、北アメリカ西岸沖、パタゴニア、東部オーストラリアや、特に東部熱帯域では良い結果と

なった。一方、相対的に予測が難しい海域としては、南大洋の大部分、西岸境界流の海域があり、これらの海域では高いエネルギーを持った様々な海流が強い海域で比較的短寿命の海洋熱波が生じている所である。また、彼らは提案した海洋熱波の予報手法は、既に存在する気象予報業務の仕組みに依存しているため、研究の段階から予報業務と言った実務段階への移行は比較的容易であるとしている。しかし、このような海洋熱波の数か月前の確立的な予測が出来たとして、利用者がその便益を得るためには、対象となる生物群集の高温耐性の特性や、対応するのにかかるコストと被害とのバランスなどその海域での様々な判断が必要である。

海洋熱波の生態系への影響は、その高温による影響を検出するためのベースラインの条件下での調査を必要とするが、このような海洋環境のモニタリングは多くの経費が掛る。これを反映して、生態学的、海洋学的に信頼できるモニタリングデータは海洋熱波の研究に関しても大きな地理的なバイアスがあることが指摘されている。つまり、海洋熱波の海洋生態系への影響の研究の大部分は、オーストラリア、ヨーロッパ、北米でなされている (Smith, et al., 2023)。また、海洋熱波の生物影響に関しては、フィールドでの調査と合わせて実験室での対象海洋生物に対する詳細な温度耐性などの研究が多く行われている。しかし、高温化と言う一つの要因への対象生物の応答を見る事が多い実験室での研究と、海洋熱波を含め複数の要因が重なる事が多い実際のフィールドで生物の応答との間のギャップはまだ大きい。この間を埋める1つの研究手法としてメゾコズムを使う研究が行われている。良い設備を持った施設では、複数の環境要因を同時に与えることが出来、群集レベルの環境応答を見る事も可能である。しかし、コストの問題でこのような研究はまだ乏しいのが現状である。

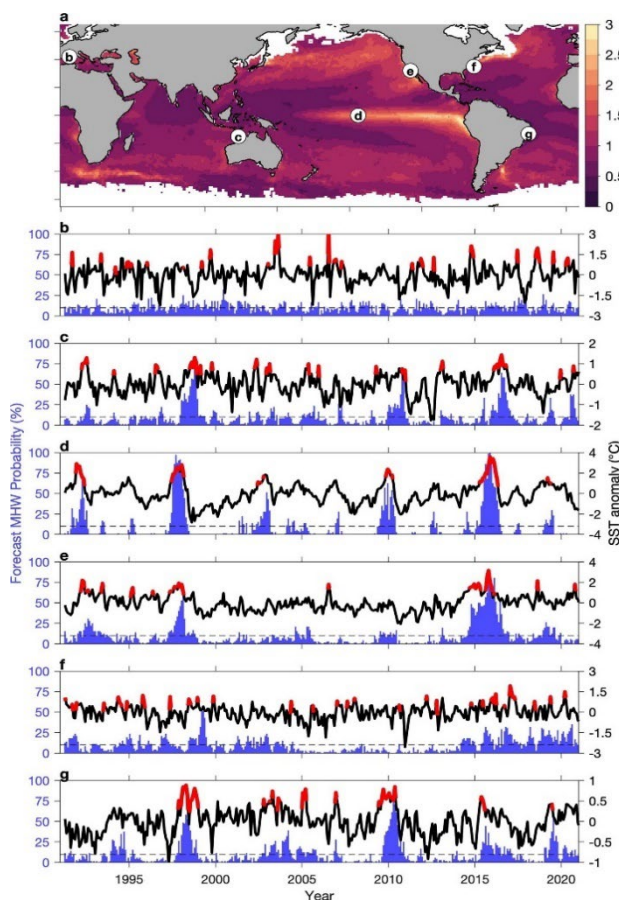


図 1.2 全球での各海域における実水温と予測モデル出力での海洋熱波の比較 (JacoX, et al. 2022)。(a) は全球マップによる観測された海洋熱波の平均的な強さと、(b) - (g) での各海域を示す。(b) - (g) は各海域における 3.5 ヶ月前での海洋熱波の生じやすさ (青) と表面水温 (SST) の実測 (黒)、および実際の海洋熱波 (赤) の時系列である。

上記のような過去のフィールドでのモニタリングや実験室での結果を生態系モデルに組み込んだ研究として、Babcock, et al. (2019) はオーストラリア沿岸での海洋熱波の頻度に対して数 10 年レベルでの生態系の応答を比較している。数 10 年に一度の単発的な海洋熱波では個々の機能グループの回復期間は、4 年から 60 年で回復時間の中央値は通常 10~15 年であったが、5 年程度で繰り返し発生する海洋熱波の場合、回復は限定的であり、その結果、生態系の一部は永久に変化した状態との結果を得ている。なお、生態系が極端な事象の変化に適応する機構である順化または遺伝的な適応があるが、現在の生態系モデルでは、これらについてはまだ対応が良くは出来ていないようである。

これまでに紹介したように海洋熱波の研究には、その成因等の海洋物理学を中心に対応する分野と、海洋熱波による生物への影響を評価する生態学を中心とした生物科学の分野とがあるが、その両者が密接に連携して将来予測される海洋熱波による被害・損失を低減していく必要がある。最後に Smith, et al. (2023) の海洋熱波についての総説で「海洋熱波に対する海洋生物の応答への今後の課題」でまとめている事を紹介する。

- (1) フィールドをベースとした観察研究では、海洋熱波のインパクトがありながらあまり調査されていない 海域に特に注目し、より広範な地理的スケールでさまざまな生態学的な

応答変数をモニタリングすることで、これらの研究の成果をより高める事が出来る。

- (2) 実験室での良く制御されたモデル実験の有用性は、複数の要因を含み、また実験対象生物の多様性と数を増やすなどのより先進的な操作実験を行う事で、その利点を大きく発揮出来るだろう。
- (3) 広く使われている海洋熱波の定義(Hobday et al. 2016, 2018) を用いて、生じた海洋熱波の強度や特性などを明確に公表することで、海域、イベント、実験等の相互比較を容易にする事が出来る。
- (4) 今後数年、数十年の極端な温暖化現象の影響を軽減するため、海洋熱波のより激化に直面した海洋生態系に関しては、これらを将来にわたって保全出来るようなアプローチの更なる開発が必要である。

文献

- Amaya, D. J., Jacox, M. G., et al. (2023). Marine heatwaves need clear definitions so coastal communities can adapt. *Nature*, 616(7955), 29-32.
- Babcock, R.C., Bustamante, R.H., Fulton, E.A. et al. (2019). Severe Continental-Scale Impacts of Climate Change Are Happening Now: Extreme Climate Events Impact Marine Habitat Forming Communities Along 45% of Australia' s Coast. *Front. Mar. Sci.* 6:411. doi: 10.3389/fmars.2019.00411
- Barnston, A. G., Tippet, M. K., Ranganathan, M. & L' Heureux, M. L. (2019). Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multi-model Ensemble. *Clim. Dyn.* 53, 7215-7234.
- Carruthers, T. J. B., & Walker, D. I. (1997). Light climate and energy flow in the seagrass canopy of *Amphiboles griffithii* (J.M. Black) den Hartog. *Oecologia* 109, 335-341. doi: 10.1007/s004420050091
- Cavole, L.M., Demko, A.M., Diner, R.E. et al. (2016). Biological impacts of the 2013-2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: Winners, losers, and the future. *Oceanography* 29(2):273-285, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2016.32>.
- Cheung, W.W.L., & Frölicher, T.L. (2020). Marine heatwaves exacerbate climate change impacts for fisheries in the northeast Pacific. *Sci Rep* 10, 6678 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63650-z>
- Collins, M. et al. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. Weyer (eds.)], pp.589-655
- Cooley, S., Schoeman, D. et al. (2022). Oceans and Coastal Ecosystems and Their

- Services. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Portner, D.C. Roberts, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 379-550, doi:10.1017/9781009325844.005.
- Donovan, M.K., Burkepile, D.E. et al. (2021). Local conditions magnify coral loss after marine heatwaves. *Science* 372, 977-980.
- Eakin, C. M., Sweatman, H. P., & Brainard, R. E. (2019). The 2014-2017 global-scale coral bleaching event: insights and impacts. *Coral Reefs*, 38(4), 539-545.
- Feng, M., McPhaden, M.J., Xie, S. & Hafner, J. (2013). La Niña forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011. *Sci. Rep.* 3, 1277; DOI:10.1038/srep01277.
- Fordyce, A.J., Ainsworth, T.D., Heron, S.F., & Leggat, W. (2019). Marine Heatwave Hotspots in Coral Reef Environments: Physical Drivers, Ecophysiological Outcomes, and Impact Upon Structural Complexity. *Front. Mar. Sci.* 6:498. doi: 10.3389/fmars.2019.00498
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T. et al. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York,
- Fredston, A.L., Cheung, W.W.L., Frölicher, T.L. et al. (2023). Marine heatwaves are not a dominant driver of change in demersal fishes. *Nature* 621, 324-329. <https://doi.org/10.1038/s41586-023>
- Hobday, A.J. et al. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves, *Prog. Ocean.*, 141, pp. 227-238, 10.1016/j.pocean.2015.12.014
- Hobday A.J., Oliver E.C.J. et al. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography* 31(2):162-73
- Holbrook N.J, Scannell H.A., Gupta A.S., Benthuyzen J.A., Feng M. et al. (2019). A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nat. Commun.* 10:2624
- Holbrook, N.J., Sen Gupta, A., Oliver, E.C.J. et al. (2020). Keeping pace with marine heatwaves. *Nat Rev Earth Environ* 1, 482-493 <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0068-4>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T. et. al. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377.
- Jacox, M.G., Alexander, M.A., Amaya, D. et al. (2022). Global seasonal forecasts of

- marine heatwaves. *Nature* 604, 486-490 <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04573-9>
- Kendrick G.A., Nowicki R.J., Olsen Y.S. et al. (2019). A Systematic Review of How Multiple Stressors From an Extreme Event Drove Ecosystem-Wide Loss of Resilience in an Iconic Seagrass Community. *Front. Mar. Sci.* 6:455. doi: 10.3389/fmars.2019.00455.
- Larkum, A.W.D., Waycott, M., Conran, J.G. (2018). Evolution and Biogeography of Seagrasses. In: Larkum, A., Kendrick, G., Ralph, P. (eds) *Seagrasses of Australia*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71354-0_1
- Leggat, W.P., Emma, F., Camp, E.F. et al. (2019). Rapid Coral Decay Is Associated with Marine Heatwave Mortality Events on Reefs. *Current Biology* 29, 2723-2730.
- Liu, G., Skirving, W., & Strong, A.E. (2003). Remote Sensing of Sea Surface Temperatures During 2002 Barrier Reef Coral Bleaching. *EOS*, 84. 15. 137-144.
- Liu, G., Heron, S. F., Eakin, C.M., Muller-Karger, F. E. et al. (2014). Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: new 5-km global products from NOAA Coral Reef Watch. *Remote Sensing* 6, 11579-11606. doi: 10.3390/rs6111579
- Liu, G, Eakin C.M., Chen M., Kumar A. et al. (2018). Predicting Heat Stress to Inform Reef Management: NOAA Coral Reef Watch' s 4-Month Coral Bleaching Outlook. *Front. Mar. Sci.* 5:5 7. doi:10.3389/fmars. 2018.00057.
- Marba, N., & Duarte, D. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x
- Miyama, T., Minobe, S. & Goto, H. (2021). Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010-2016. *Front. Mar. Sci.* 7:576240. doi: 10.3389/fmars.2020.57624
- Nowicki, R., Heithaus, M., Thomson, J., Burkholder, D., Gastrich, K., & Wirsing, A. (2019). Indirect legacy effects of an extreme climactic event on a marine megafaunal community. *Ecol. Monogr.* e01365. doi: 10.1002/ecm.1365
- Oliver, E.C.J., Benthuisen, J.A., Darmaraki, S., Donat, M.G., Hobday, A.J. et al., (2021). Marine heatwaves. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 13:313-42.
- Pearce, A., Lenanton, R., et al. (2011). The “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/11. *Fisheries Research Report* No. 222. Department of Fisheries, Western Australia. 40pp.
- Plecha, S.M., & Soares, P. M. M. (2020). Global marine heatwave events using the new CMIP6 multi-model ensemble: from shortcomings in present climate to future projections. *Environ. Res. Lett.* 15 124058
- Rogers, L. A., Wilson, M. T. et al. (2020). Pollock and “the Blob” : Impacts of a marine heatwave on walleye pollock early life stages. *Fish. Oceanogr.*, 142-158.

- Rogers-Bennett, L., & Catton, C.A. (2019). Marine heat wave and multiple stressors tip bull kelp forest to sea urchin barrens. *Sci Rep* **9**, 15050 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51114-y>
- Salinger, M.J., Renwick, J., Behrens, E. et al. (2019). The unprecedented coupled ocean-atmosphere summer heatwave in the New Zealand region 2017/18: mechanisms and impacts. *Environ. Res. Lett.* **14** (2019) 044023 DOI 10.1088/1748-9326/ab012a
- Sherman, C. D. H., Smith, T. M., York, P. H., Jarvis, J. C., Ruiz-Montoya, L., & Kendrick, G. A. (2018). “Reproductive, dispersal and recruitment strategies in Australian seagrasses,” In Seagrasses of Australia: Structure, Ecology and Conservation, eds A. W. D. Larkum, G. A. Kendrick, and P. J. Ralph (Cham: Springer International Publishing), 213-256. doi: 10.1007/978-3-319-71354-0_8
- Smith, K.E., Burrows, M. T. et al. (2021). Socioeconomic impacts of marine heatwaves—global issues and opportunities. *Science*, **374**, 6566 DOI:10.1126/science.abj3593
- Smith, K.E., Burrows, M. T. et al. (2023). Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annu. Rev. Mar. Sci.* **15**:119-45.
- Souza J.MAC., Felsing, M., Jakoboski, J., Gardner, J.P.A., & Hudson, M. (2023). Moana Project: lessons learned from a national scale transdisciplinary research project. *Front. Mar. Sci.* **10**:1322194. doi: 10.3389/fmars.2023.1322194
- Straub, S.C., Wernberg, T., Thomsen, M.S., Moore, P.J. et al. (2019). Resistance, Extinction, and Everything in Between - The Diverse Responses of Seaweeds to Marine Heatwaves. *Front. Mar. Sci.* **6**:763. doi: 10.3389/fmars.2019.00763
- Thomsen M.S., Mondardini, L., Alestra, T., et al. (2019). Local Extinction of Bull Kelp (*Durvillaea* spp.) Due to a Marine Heatwave. *Front. Mar. Sci.* **6**:84. doi: 10.3389/fmars.2019.00084
- Tseng, Y-H., Ding, R., & Huang, X-M. (2017). The warm Blob in the northeast Pacific—the bridge leading to the 2015/16 El Nino. *Environ. Res. Lett.* **12**:054019
- 大森信・岩尾研二、(2014) 有性生殖を利用したサンゴ種苗生産と植え付けによるさんご礁修復のための技術手法. 熱帯海洋生態研究振興財団.
- 石井雅男・見延庄士郎 (2021) 「国連海洋科学の10年」—one oceanにむけて—気候変化と変動の観点から気候変化と変動の観点から. 学術の動向、2021, 1. 28 - 32.