

九州周辺海域における近年の海洋熱波の発生傾向

古賀, 大基
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻地球環境理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7361924>

出版情報：九州大学, 2024, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和6年度
九州大学大学院総合理工学府
総合理工学専攻地球環境理工学メジャー修士論文

九州周辺海域における
近年の海洋熱波の発生傾向

氏 名 古賀 大基

指導教員名 木田 新一郎 准教授

概要

地球温暖化によって頻発し始めた現象の一つに、海洋熱波がある。海洋熱波とは、数日から数年間にわたり海水温が平年よりも顕著に高い状態が続く現象である。海洋熱波が発生すると、海洋生物の生息環境が変化し、絶滅をも引き起こすことがあるため、沿岸域の生態系は大きく影響を受けることになる。これまでの研究から、海流の流路や異常気象といった様々な環境変動がきっかけとなって海洋熱波が発生することが明かになってきた。しかし九州周辺海域を対象とした解析は十分に進んでいない。複雑な海岸線を持ち、黒潮と対馬暖流の二つの暖流の影響を受ける九州周辺海域ではどのような発生傾向があるのだろうか。本研究は、海洋データ同化プロダクトの日平均海面水温を用いて、2019～2023 年の間に九州周辺の海域で発生した海洋熱波の特徴を明らかにすることが目的である。

海面水温データから九州周辺海域で 2019～2023 年の間に発生した 1 年あたり平均発生回数と平均発生日数を求めた結果、その特徴は九州が面する海域（太平洋・東シナ海・日本海）によって大きく異なることが明らかになった。対馬暖流が日本海へと流れる九州北部の海域では、九州から韓国沿岸までの広い範囲で海洋熱波が発生しやすく、回数・日数ともに多かった。九州の南東沖の海域では、発生回数は多いものの、その日数は少なく、寿命が短い海洋熱波が頻発することが推察された。九州南西沖は、発生回数・日数ともに少なく、海洋熱波が発生しにくい海域となっていた。この特徴は海洋熱波を定義するうえで鍵を握る海面水温の閾値を変えても、大きな変化は見られなかった。また、季節ごとに発生日数を調べたところ、水温の経年変動が大きい季節ほど海洋熱波の持続時間が短いことが示唆された。

発生頻度の高い九州北部の海域に注目して海洋熱波の発生時期や空間分布の変化を解析したところ、季節によって持続時間や強度が大きく異なることが明らかになった。冬から春にかけては持続時間が長く、夏には強度が最も大きかった。また、海洋熱波発生時の海中水温偏差と合わせて解析したところ、冬から春、そして秋に発生する海洋熱波は、海中まで温められた海水の移流によって発生していること、夏に発生する海洋熱波は、水温上昇が海面に集中しており、直上大気による加熱が主要な駆動要因であることが示唆された。今後、九州周辺の各海域における海洋熱波の発生メカニズムを正確に解明するには、海洋混合層における熱収支の解析を行い、大気と海流が果たす役割をより定量的に明らかにする必要がある。

目次

第1章 はじめに	4
1.1 研究背景	4
1.2 先行研究	4
1.3 研究目的	4
1.4 論文の構成	5
第2章 使用データと解析手法	6
2.1 使用データ	6
2.1.1 JCOPE-T	6
2.1.2 MODIS	6
2.1.3 MGD SST	6
2.2 解析手法	7
2.2.1 海洋熱波の判定方法	7
2.2.2 気候値の作成方法	7
2.2.3 閾値の推定方法	7
2.2.4 バイアスの補正方法	7
第3章 九州全体の海洋熱波の発生傾向	12
3.1 バイアス補正前	12
3.2 バイアス補正後	12
3.2.1 感度実験（80 パーセントイル）	13
3.2.2 感度実験（5 日ウィンドウ）	13
3.3 考察	14
第4章 対馬海峡周辺における海洋熱波の特徴	23
4.1 水温の時間変化	23
4.2 冬の海洋熱波の特徴	23
4.2.1 海面における水温偏差の空間分布	23
4.2.2 海中における水温偏差の空間分布	23
4.3 夏の海洋熱波の特徴	24
4.3.1 海面における水温偏差の空間分布	24
4.3.2 海中における水温偏差の空間分布	24
4.4 秋の海洋熱波の特徴	24
4.4.1 海面における水温偏差の空間分布	24
4.4.2 海中における水温偏差の空間分布	25
4.5 考察	25
第5章 まとめ	39

第1章 はじめに

1.1 研究背景

地球温暖化による水温の上昇や海面水位の上昇は、海中の溶存酸素量が減少する貧酸素化や沿岸の陸地の水没など、様々な環境変化を引き起こすことが知られている（気象庁, 2024a; 気象庁, 2024b）。そして近年、海洋で生じている環境変化の中で注目されているのが海洋熱波と呼ばれる現象である。

海洋熱波とは、数日から数年間にわたり海水温が平年よりも顕著に高い状態が続く現象である（Hobday et al., 2016）。海水の高水温が長く続くと海洋生物の生息地が変わることで、本来その海域で獲れていた漁業種が獲れなくなり、水産業を中心に多大な影響を及ぼす（Perry et al., 2005）。

海洋熱波に関するこれまでの研究から、2003年の夏の地中海（Garrahou et al., 2009）、2011年の夏の西オーストラリア（Feng et al., 2012）、2012年の北西大西洋（Mills et al., 2012）など、中緯度域において海洋熱波が頻繁に発生していることが明らかになっている。これらの海域はいずれも生物多様性が高く、海洋熱波による影響は甚大である。実際に、2016年にオーストラリアで発生した海洋熱波は、グレートバリアリーフにおけるサンゴ礁の90%以上を白化させたことが知られている（Hughes et al., 2017）。サンゴの白化は、サンゴの細胞内に共生する褐虫藻という植物プランクトンが、水温変化や強い光の影響を受け活動を停止することで起こる。日本では、親潮域において2010～2016年の夏に海洋熱波が毎年発生した（Miyama et al., 2021）。2010年代の北日本沿岸域では継続的に温まった海域に温水魚が移動してきたのに対し、冷水魚がほかの海域に生息域を移動したことと、ブリやヒラマサなどの温水魚の漁獲量の増加およびサンマなどの冷水魚の漁獲量の減少との関連性が指摘されている。

地球温暖化による継続的な海水温の上昇によって、海洋熱波の発生日数は今後さらに増加すると予想されており（Oliver et al., 2018）、海洋熱波の発生メカニズムを解明し、生態系への影響を定量的に評価する必要がある。海洋熱波の発生は、海域によって流れる海流の特性や地形の違い、さらには大気との相互作用といった様々な条件が引き金となる。そのため、まずは海域ごとに海洋熱波の持続時間や強度の特徴を明らかにすることが重要である。

1.2 先行研究

日本周辺の海域で発生した海洋熱波は、これまで主に日本の北部を中心に研究が進められている。例えば Kuroda & Setou (2021) では、2021年の夏に日本海全域とオホーツク海の一部を含む北西太平洋の広域で発生した海洋熱波について、海上風や上空の気圧など大気の影響を熱収支解析から調べている。そして、海洋熱波の分布は海面熱フラックスと強く関連しており、大気が主な駆動要因となり海洋熱波が発生したことが指摘されている。また、Miyama et al. (2021) では、2010～2016年の夏に北海道南東の親潮域で発生した海洋熱波が、黒潮流域から分離した中規模の温暖な渦が侵入したことにより発生した可能性が、水温と塩分の分布から指摘されている。

一方、これまで九州周辺の海域での海洋熱波の解析は行われていない。九州周辺の海域は、豊かな漁場として知られ、太平洋、東シナ海、日本海、瀬戸内海といった多様な海域が周囲に広がっている。近年、高水温によって海藻類が枯れたり、ウニやアイゴなどの生物に食べつくされたりすることで藻場が

消滅する磯焼けが発生しており、磯焼けが発生すると、海藻を食べる貝や、そこを住処とする魚がいなくなり、漁業に影響を与える。

西岸境界流が流入し、熱帯低気圧が通過する夏の気候条件が九州と似たメキシコ湾では、熱帯低気圧が通過した際に海水が鉛直方向に一様に混合し、大気から熱を吸収して水温が上昇した結果、海洋熱波が発生したことが指摘されている(Dzwonkowski et al., 2020)。黒潮、対馬暖流などの海流に加え、熱帯低気圧の影響を受ける九州周辺の海域でも、同様の形で海洋熱波が発生する可能性がある。

1.3 研究目的

本研究の目的は、これまで研究されていなかった九州周辺海域における海洋熱波の発生傾向を、海洋データ同化プロダクトを用いて調べることである。黒潮と対馬海流という二つの暖流の影響を受け、複雑な海岸線や多くの島々が存在する九州周辺の海域において、どのような発生傾向があるのかを明らかにする。本研究では、海洋データ同化プロダクト JCOPE-T DA によって再現された日平均海面水温データを使用することで、九州周辺の海域において 2019～2023 年の間に発生した海洋熱波の発生頻度と持続時間を解明する。

本研究で使用する JCOPE-T DA は、多くの観測データを数値モデルに取り込んだ再解析モデルであり、現実的な海洋の過去の状態を再現したものである。衛星観測や定地水温などの観測データと比較して、数値モデルには次のような利点が挙げられる。まず、衛星観測は、雲の影響でデータが得られる日数が制限され、欠損値が多く存在する。しかし、再解析データには欠損値がなく、すべての日のデータを得ることができ、水温の時系列変化を連続的に解析することができる。また定地水温観測は、欠損値が比較的少なくデータを取得することができるが、点でしかデータを得ることができないため空間分布に偏りが生じる。

本研究では、JCOPE-T DA を用いて、海面に加えて水深 20 m・100 mにおける水温変化の解析も行う。海中の水温の変化も解析することで、季節や海域によって異なる可能性がある海洋熱波の鉛直構造を明らかにする。

1.4 論文の構成

本論文は全 5 章で構成されており、各章の内容は下記の通りである。

第 1 章では、海洋熱波が生態系に与える影響と、日本周辺の海洋熱波の先行研究を概観し、本研究の目的である九州周辺海域の海洋熱波の発生傾向を明らかにする重要性を述べた。

第 2 章では、本研究で使用する三種類の水温データの詳細を説明し、それらを用いた解析方法を示す。

第 3 章では、九州周辺海域で発生した海洋熱波の発生回数と発生日数の空間分布を解析し、近年の海洋熱波の発生傾向について考察する。

第 4 章では、特に対馬海峡周辺に焦点をあて、海洋熱波の時間変動および空間変動を詳細に解析し、その季節性と発生メカニズムについて考察する。

第 5 章では、上記の内容を総括し、本論文の結論を提示する。

第2章 使用データと解析手法

2.1 使用データ

本研究で使用する三種類の水温データの概要を説明する。

2.1.1 JCOPE-T

JCOPE-T DA は海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が 2018 年 6 月から運用する日本周辺の海況予報を行う数値モデルであり、20 日先までの予測値が得られる (林田ら, 2024)。JCOPE-T DA は多重スケール三次元変分法と呼ばれる手法を用いてひまわり 8 号の観測データ (Kurihara et al., 2016) や MGD SST (気象庁, 2024c) を数値モデルに同化している (Miyazawa et al., 2021)。モデル領域は日本近海であり、水平解像度が約 3 km と高いため、沿岸域の水温変化を表現できる。本研究では JCOPE-T DA による再解析データを用い、時間解像度は 1 時間、解析範囲はおよそ $128^{\circ}\text{E}\sim 133^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、そしてデータ期間は 2019~2023 年である。水温は海面、水深 20 m および 100 m を用いる。

2.1.2 MODIS

MODIS 海面水温データは 1999 年 12 月に打ち上げられた地球観測衛星 Terra、そして 2002 年に打ち上げられた地球観測衛星 Aqua に搭載されている可視・赤外域の放射計で取得されたものである (Hosoda et al., 2007)。水平解像度は約 4 km と、JCOPE-T DA の解像度と近い。データの取得日数は 1 日ごとだが、雲によってデータが取得できない日があるため、データには欠損値が含まれる。本研究で用いる解析範囲はおよそ $128^{\circ}\text{E}\sim 133^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ であり、データ期間は 2003~2022 年のものである。

2.1.3 MGD SST

MGD SST は気象庁が提供する海面水温データである (気象庁, 2024c)。MGD SST は衛星、船舶、ブイによって観測されたデータを統合した海面水温データであり、全球をカバーしている。1982 年以降のデータがあり、JCOPE(日本沿海予測可能性実験)シリーズのデータ同化に使用されている (Miyazawa et al., 2017; Miyazawa et al., 2021)。水平解像度は約 25 km、時間解像度は 1 日ごとである。本研究で用いる解析範囲は MODIS データと同様で、およそ $128^{\circ}\text{E}\sim 133^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ であり、データ期間は 2003~2022 年の 20 年間のものである。

2.2 解析手法

2.2.1 海洋熱波の判定方法

海洋熱波は、これまで様々な定義が用いられてきた。たとえば、Sorte et al. (2010) は「平均または最大水温が平年より少なくとも 3～5 度高い期間が 3～5 日以上続く期間」と固定された閾値を用いて定義した。現在、世界的に最も用いられているのは Hobday et al. (2016) のものである。海洋熱波判定にパーセンタイルに基づく閾値を採用しており、「長期間データから求めた気候値に対する 90 パーセンタイルを超える水温が少なくとも 5 日間以上続き、その間に 90 パーセンタイルを下回る日が 2 日以内である事象」という定義を提唱した (図 2.1)。ここで 90 パーセンタイルとは、データを大きさ順に並べた際に、小さい方から 90 %の位置に相当する値である (図 2.2)。パーセンタイルを用いることで海域ごとの傾向に合った閾値を設定でき、全海域で統一した基準に基づいて発生する海洋熱波を検出することができる。

本研究では、Hobday et al. (2016) の定義をもとに JCOPE-T DA で得られる 2019～2023 年の九州周辺の日平均海面水温から海洋熱波を判定する。判定に必要な気候値および閾値は、2003～2022 年の MODIS 海面水温データを用いた。

2.2.2 気候値の作成方法

JCOPE-T DA を用いて、日々の海面水温データを得ることができるが、データ期間が五年程度と短いため、気候値を求めることができない。そこで、JCOPE-T DA と水平解像度が近い MODIS の 2003～2022 年の海面水温データを用いて気候値 T と閾値を求める。ただ欠損値が多く含まれるため、気候値は次式で表す曲線近似から求めた。

$$T = d + a_1 \cos 2\pi \frac{t}{365} + b_1 \sin 2\pi \frac{t}{365} + c \frac{(t - 10 * 365)}{20 * 365} + a_2 \cos 4\pi \frac{t}{365} + b_2 \sin 4\pi \frac{t}{365} \\ + a_3 \cos 6\pi \frac{t}{365} + b_3 \sin 6\pi \frac{t}{365} + a_4 \cos 8\pi \frac{t}{365} + b_4 \sin 8\pi \frac{t}{365}$$

上式はフーリエ級数展開を用い、1 年周期、6 か月周期、4 か月周期、3 か月周期の変動の組み合わせから求めた気候値である。 d は長期年平均値、 c は 10 年当たりの昇温トレンドであり、九州周辺の海域におけるトレンド平均値は 0.283 度/10 年であった (図 2.3)。

本研究で用いる気候値は昇温トレンドを考慮しない。つまりトレンド項 (c を含む項) を除いた残りのパラメータを基に曲線を復元し、日々の気候値を算出した。

2.2.3 閾値の推定方法

閾値は、気候値と並んで海洋熱波の判定における重要なパラメータである。本研究では、Hobday et al. (2016) の定義である 90 パーセンタイル値を閾値として用いる。90 パーセンタイル値には、Jacox et al. (2022) を参考に、データの前後 45 日 (3 か月間) の水温偏差を用いて算出した値を使用する。

気候値と同様に、MODIS の 2003～2022 年の海面水温データを用い、上記の手法で得た気候値を差し引いて日平均水温偏差を算出する。この日々の水温偏差に加え、前後 45 日の水温偏差から取り出した 20 年間分の水温偏差から 90 パーセンタイルを算出する。例えば、7 月 1 日の閾値は 2003～2022 年の 5 月 17 日から 8 月 15 日までの海面水温偏差をもとに算出した値を使用する。この計算を 365 日分繰り返すことで、1 年の各日付に対応した固有の閾値を算出する。

2.2.4 バイアスの補正方法

MODIS で得られる海面水温データには、バイアスが存在することが知られている。そこで、バイアスの補正のために MGD SST を用いる。MGD SST は、MODIS に比べて解像度が低い、JCOPE-T DA の再解析にも使用されているため、背景場として用いる水温場としては MGD SST が最適だと考えた。

バイアスの補正は、python を用いて以下の手順で MODIS がもつ高解像度の空間偏差を保持しつつ、背景場を MGD SST の海面水温に近づける形で行った。

1. MODIS の解像度を MGD SST の解像度に下げるダウンサンプリングを行う。MODIS データをもとに MGD SST グリッドへ線形補間をする (MODIS 低解像度データ)。MODIS 低解像度データと MGD SST の差を求め、この値を MODIS に含まれるバイアス値とした (図 2.4a)。
2. バイアスデータの解像度 (MGD SST と同じ) を、線形補間を用いて MODIS の解像度に変換する。この値を MODIS の値から差し引くことで、MODIS がもつ高解像度の水温勾配情報を保持しつつ、MGD SST に基づく補正值が得られる (図 2.4b)。

MGD SST は、MODIS より低解像度のため、バイアス値を求める際に海岸線近くで欠損値となることがある。そこで、海岸線近くの欠損値となっているグリッド点は、周囲のバイアス値から求めた中央値とした (図 2.5)。この方法により、海岸線近くのデータも、空間的な連続性を確保しつつ、バイアス補正を実施した。

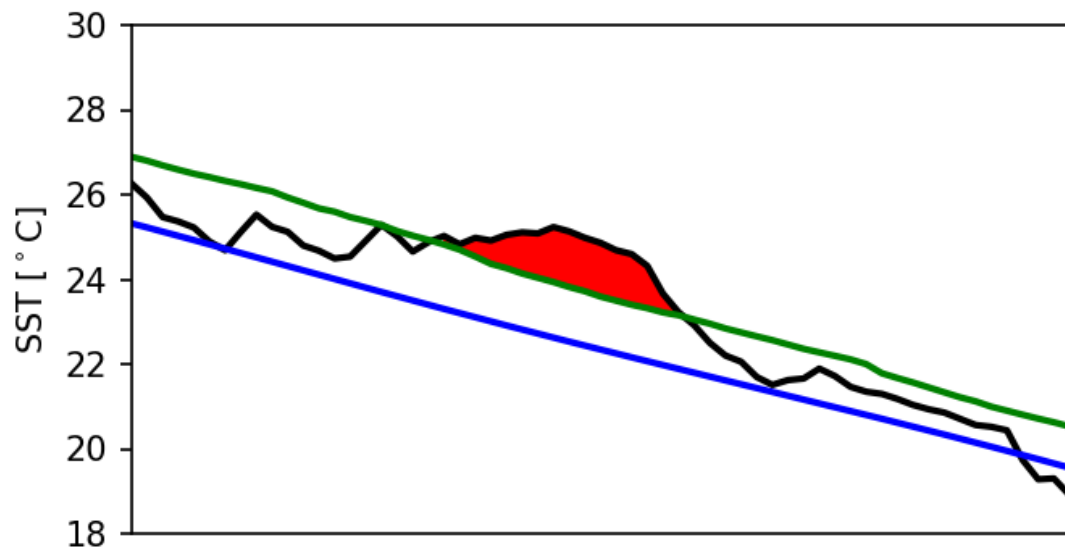


図 2.1 海洋熱波の一例。黒線は日別海面水温、青線は気候値、緑線は閾値。横軸が日数。赤色が示す海面水温が 5 日以上連続で閾値を上回っている期間が、海洋熱波と判定される。

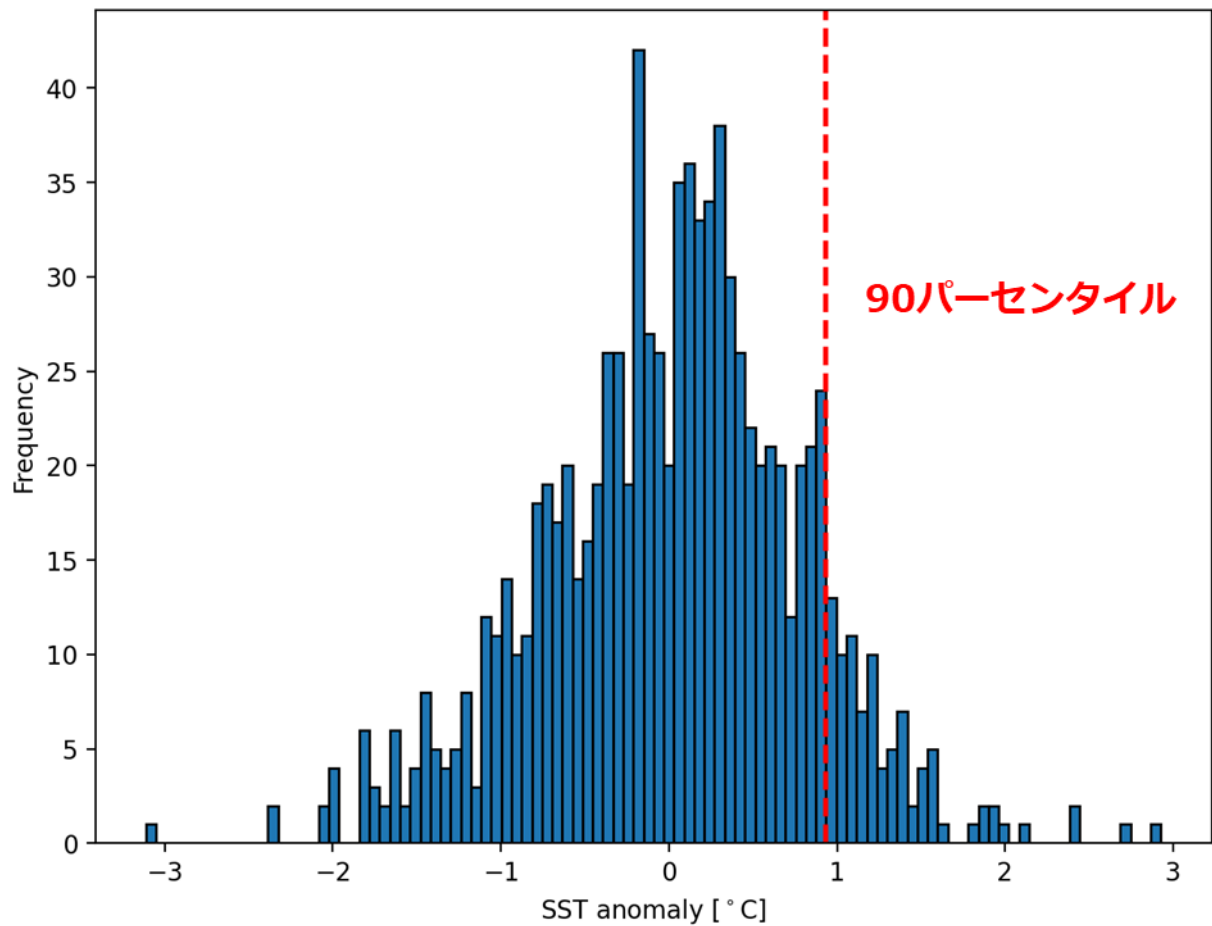


図 2.2 閾値の推定方法の一例。水温偏差の発生率が 10%以下となる 90 パーセンタイル値を閾値とする。

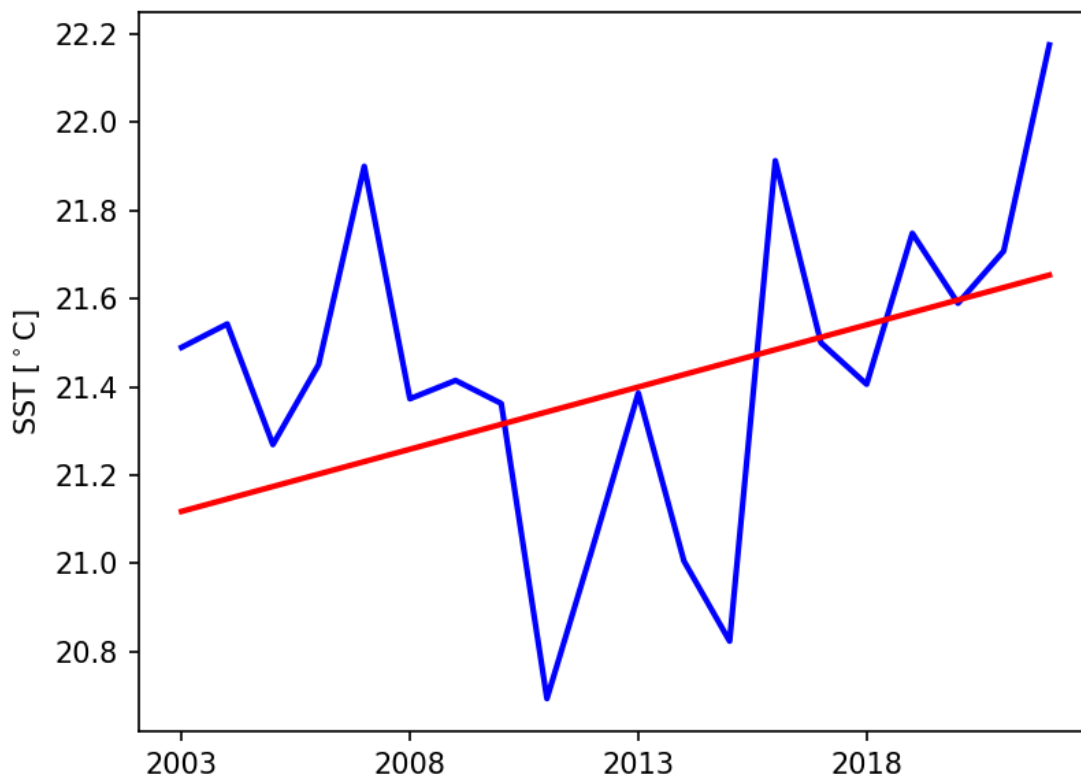


図 2.3 2003～2022 年の九州周辺海域の年平均海面水温。青線が海面水温、赤線が 20 年間のデータから求めたトレンド。

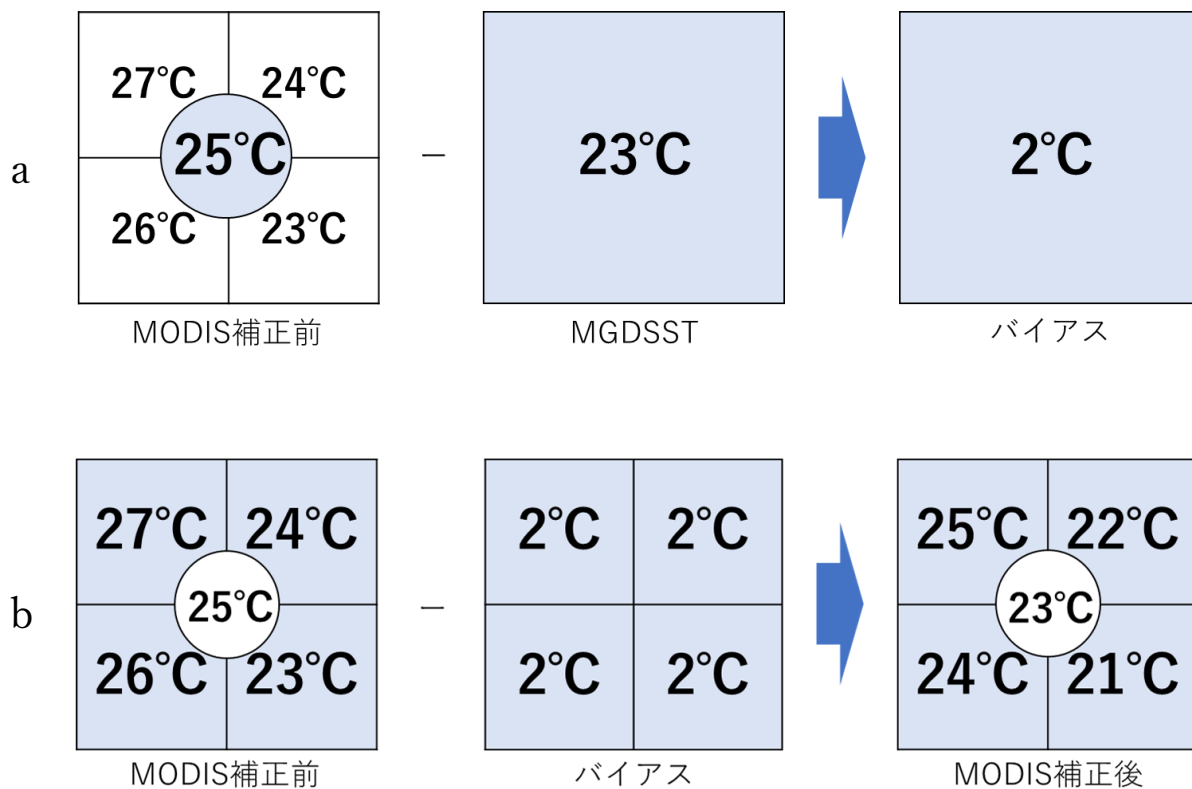


図 2.4 バイアス補正を行う計算の手順。(a)バイアスの求め方。丸で囲まれた値が MODIS から求めた MGDSST グリッド上の水温。この値と MGDSST との差をバイアスとする。(b) MGDSST グリッド上で定義されたバイアスを用いて MODIS グリッド点のバイアス値を求め、水温を補正する。

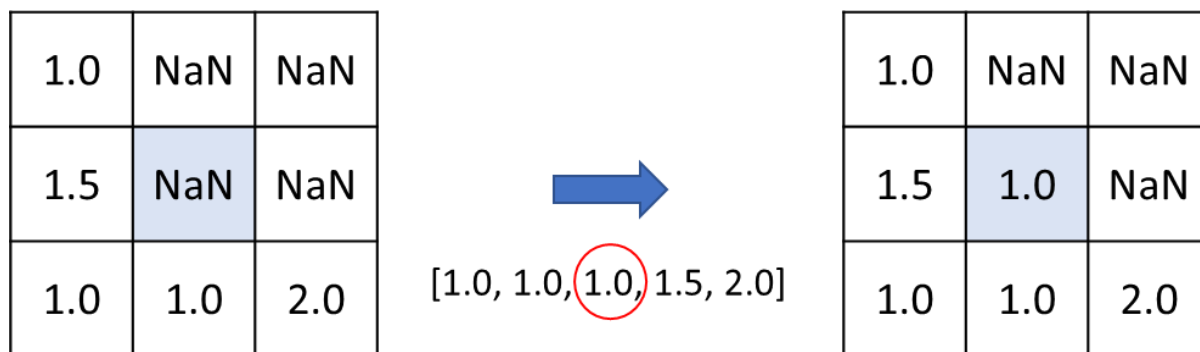


図 2.5 MODIS グリッド上でのバイアス値（図 2.4a の右をより広範囲で示した図）。用いるバイアス値が欠損していた場合は周囲（8 点）の中央値とする。

第3章 九州全体の海洋熱波の発生傾向

本章では、九州周辺の海域において2019～2023年の間に発生した海洋熱波を示す。まず1年あたり平均発生回数と平均発生日数を求め、その空間分布と強度を示す。その後、海洋熱波の判定に用いる閾値に対する発生傾向の感度を調べる。

3.1 バイアス補正前

MODIS から算出した月別気候値は、典型的な季節変動を示した。1月には、水深が浅い九州北部や瀬戸内海で15度以下に冷えている一方、鹿児島から宮崎にかけては黒潮の流軸に沿うように20度近くの温かい海水が確認できる。(図3.1a)。7月は28度近くまで温まった海水が黒潮の流軸に沿って存在し、対馬海峡付近では太平洋域と比べると冷たく、25度程度である(図3.1b)。また瀬戸内海はさらに低く、22度程度である。

MODIS のバイアスを補正する前の気候値と JCOPE-TDA を用いて、Hobday et al. (2016) の定義に基づいて2019年～2023年の間に九州周辺海域で発生した海洋熱波の平均発生回数と平均発生日数を求めたところ、1年あたり最大9回(図3.2a)、そして発生日数は最大257日であった(図3.2b)。年間の半分以上が海洋熱波となっていることから、水温バイアスの影響を受けていることが示唆される。

発生回数の空間分布は、海域によって大きく異なることを示していた。北部の対馬海峡周辺は年間5回以上と発生回数が多く、壱岐・対馬では7回以上、そして九州から韓国沿岸まで広く発生している(図3.2a)。また黒潮が流れる南東部では沿岸近くと沿岸から100km程度離れた沖で発生回数が多く、年間5～8回であった。対馬海峡と比べ、沿岸と沖合の間に発生回数が少ない海域がある。一方、南西部では年間2～4回と発生回数が低い。この海域でも南東部と同様に黒潮が流れているが、海洋熱波の発生回数には東西差がある。瀬戸内海では、年間1～3回と少ない海域もあるが、九州から四国にかけて年間6～9回発生する海域もあり、空間的变化が大きい。

発生日数の空間分布も、発生回数と同様に海域によって大きく異なる。北部の九州から韓国沿岸まで広い範囲では年間90日以上発生しており、沿岸近くでは170日以上にまで達していた(図3.2b)。南東部では、発生回数と同様に沿岸近く、そして沿岸から100km程度離れた沖で発生日数が多く、年間100日以上発生していた。また沿岸と沖合の間の海域に発生日数が60日以下と少ない海域がある。南西部も年間50日以下と発生回数と同様に他の海域と比べて低かった。瀬戸内海では、本州側では年間50～90日と少ない海域があるものの、年間200日以上と九州周辺の海域の中で顕著に多い発生日数の海域もあり、空間的变化が大きい。

3.2 バイアス補正後

次に、MGDSST を用いて、MODIS データのバイアスを補正した。バイアス値の季節変化を3か月平均[1～3月(JFM)、4～6月(AMJ)、7～9月(JAS)、10～12月(OND)]を用いて検証したところ、九州周辺の海域ではすべての季節において低温バイアスが顕著であった(図3.3)。また、全体とし

て沖合ほどバイアス値が小さく、沿岸近くで大きい。JFM は黒潮の流れる九州南部や北部の対馬海峡部の沖合まで-0.2~-0.7 度程度のバイアスが存在していたが、沿岸近くでは-1.5 度以下と非常に低く、瀬戸内海や有明海では特に低かった。AMJ は JFM と同様に-0.2~-0.7 度のバイアスが沖合に存在し、瀬戸内海や有明海では-1.5 度以下のバイアスが存在した。ただし韓国沿岸や福岡沿岸付近では-1.0 度程度のバイアスであり JFM より小さかった。JAS はほかの季節と異なり、九州南部と北部で明確な違いがあった。南部では-0.1~-0.4 度程度のバイアスがあったが、北部ではほとんどなかった。ただし、福岡と長崎沿岸の一部では 0.5 度程度の高温バイアスが確認された。OND は沖合のバイアスは JFM と AMJ と似て-0.2~-0.5 度程度であり、瀬戸内海のバイアスが若干小さかった。

バイアス補正した MODIS の気候値と JCOPE-T DA を用いて、海洋熱波の平均発生回数と平均発生日数を求めたところ、九州周辺では 1 年あたり最大 6.8 回 (図 3.4a)、そして発生日数は最大 141 日 (図 3.4b) とバイアス補正前より減少した。この減少は主に低温バイアスであったことと一致する。

発生回数は、バイアスを補正する前と比較して減少していることに加え、空間分布の変化がより顕著になった。北部では壱岐と山口の日本海側の沿岸を中心に、発生回数が多い傾向を示した。一方、対馬暖流の流軸近くでは発生回数が低い海域がみられ、島原や天草の沿岸近くも大きく減少した。南東部の沖合では発生回数が 2 回程度減少したものの、年間 3~6 回と補正前と同様に多い傾向であった。一方、沿岸近くは大幅に減少し、発生回数が少ない海域になった。南西部は発生回数が低い傾向のままであった。黒潮流域では、南東部の沖合においてのみ発生回数が多いのが特徴である。瀬戸内海は、補正前に確認された大きな空間的変化が緩和され、かつ発生回数も減少した。

発生日数は、発生回数と同様にバイアス補正によって減少したが、空間分布の傾向は瀬戸内海を除いて補正前と同じであった。北部は年間 60 日以上と多い海域となっており、特に壱岐・対馬周辺、それと山口の日本海側の沿岸は、80 日以上発生していた。南東部は、沖合で年間 40~60 日と沿岸と比べて多かった。南西部の発生日数は全体的に 30 日以下と低く、九州南部における東西の差はバイアス補正前よりも縮小した。瀬戸内海は大幅に減少し、発生個所は主に佐多岬周辺に集中していた。これ以降、海洋熱波の解析に用いる気候値はバイアス補正した MODIS を使用する。

3.2.1 閾値に対する感度実験 (80 パーセンタイル)

海洋熱波の閾値に対する発生傾向の感度を調べるため、海面水温偏差の 80 パーセンタイルを閾値とした。得られた海洋熱波の平均発生回数および平均発生日数と 90 パーセンタイルの閾値を用いた結果との差を求めたところ、閾値を下げることで発生回数が 1 年あたり最大 5 回増加し (図 3.5a)、発生日数も最大 91 日増加した (図 3.5b)。

発生回数は、九州全体で年間 1 回~4 回増加したものの、その空間分布はまばらであり、特徴的な分布は見られなかった。一方、発生日数は、90 パーセンタイルの閾値で発生日数が多かった海域ほど増加していた。北部では発生日数が 50~90 日増加し、増加しなかったのは対馬海峡の西側のみである。南東部では沿岸から 100 km ほど離れた沖合で 40~80 日の増加を示したのに対し、南西部では全体的に 10~40 日の増加にとどまり、東西差が再び現れた。瀬戸内海では、佐多岬周辺で増加していた。

3.2.2 閾値に対する感度実験（5日ウィンドウ）

次に閾値を推定するときに参照する水温偏差の日数（ウィンドウ）を、閾値を求める日付の前後45日から前後5日に小さくした。得られた海洋熱波の平均発生回数および平均発生日数と前後45日ウィンドウを用いた結果との差を求めたところ、発生回数が1年あたり最大3.6回増加し（図3.6a）、発生日数は最大40日増加した（図3.6b）。

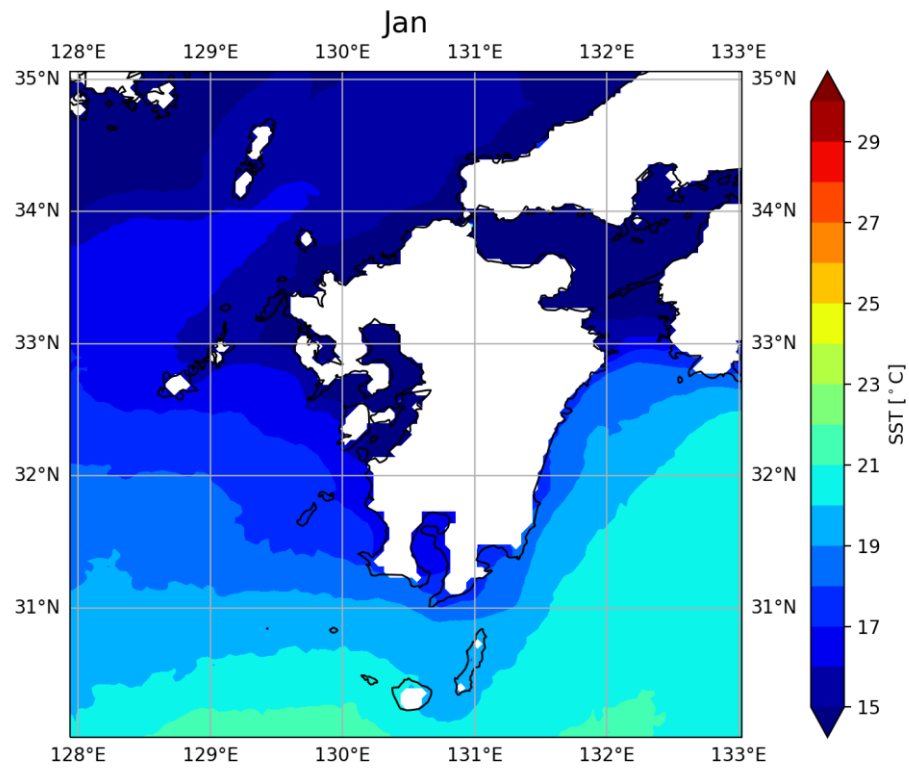
発生回数は、前後45日ウィンドウで発生回数が多かった海域では増加したものの、発生回数が2回を下回っていた海域では減少した。つまり、発生回数の空間的变化を強めた。発生日数もまた、発生回数と同様の傾向を示し、前後45日ウィンドウのときと比べて空間的变化が強くなった。

3.3 考察

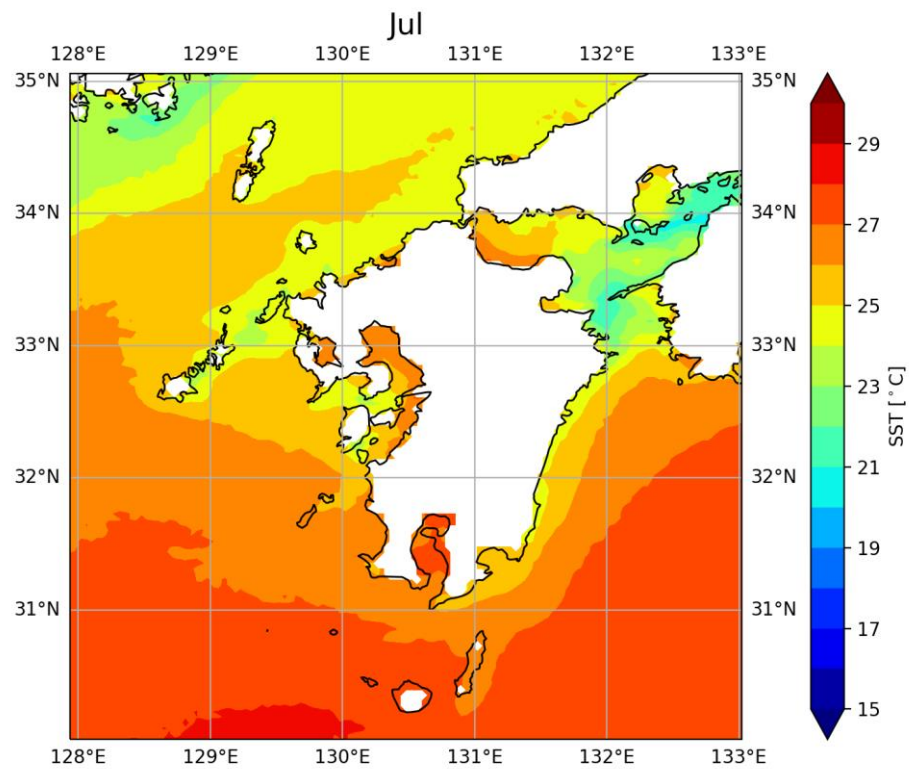
再解析データを用いることで、九州の周辺海域では、対馬暖流の周辺海域、そして黒潮の沖合域を中心に発生していることがわかった。海洋熱波の平均発生回数は北部や南東沖で多く、北部では平均発生日数が南東沖よりも多い傾向があることが明らかになった。このことから、南東沖の海洋熱波は北部と比べて一回のイベントあたりの持続時間が短い傾向がある。一方で、南部沿岸、有明海、瀬戸内海ではバイアス補正によって顕著に発生回数と日数が減少しており、これはバイアス補正を行う際に求めた海岸線付近の欠損値の外挿によって求められた値が、本来のバイアス値よりも低かった可能性がある。

海洋熱波の発生の有無は、水温偏差のパーセンタイル値から決定される。つまり水温の擾乱の大きさが発生分布に影響を与えていると考えられる。そこで、海域ごとの存在する水温偏差の擾乱の大きさと海洋熱波の発生傾向の関係を調べるため、3か月ごとの期間別（JFM、AMJ、JAS、OND）に水温偏差の標準偏差と海洋熱波の発生日数を求めてみた（図3.7; 図3.8）。すると北部では、発生日数が50日近いJFMとONDでは標準偏差は0.5~0.8度であったのに対し、発生日数が20日程度のJASでは標準偏差は1.1~1.3度と標準偏差が大きい季節ほど海洋熱波は発生していないことが明らかになった。南東部でも、発生日数が30~40日であったONDでは標準偏差が0.6~0.8度であったのに対し、発生日数が10日以下のJFMでは標準偏差は1.0~1.3度であった。南西部も同様に、発生日数が20~30日であったONDでは標準偏差が0.5~0.8度であったのに対し、発生日数が10日以下のAMJでは標準偏差は0.7~0.9度であった。水温の擾乱が大きい季節でも海洋熱波は発生するものの、水温の擾乱が小さい季節のほうが海洋熱波の持続性が高いことが示唆された。

閾値に対する海洋熱波の発生回数と日数の感度を80パーセンタイルに下げた場合と閾値を求める際のウィンドウを小さくする二つのケースを比較した。結果、パーセンタイルを変えると発生回数は九州周辺の海域全体で増加するものの、発生日数は、もともと発生日数が多かった海域でのみ顕著に増加することがわかった。つまり、海洋熱波の少ない海域ではたとえ発生回数が増加したとしても、持続しない。一方、参照日のウィンドウを小さくすると、発生回数と発生日数は同様の増加傾向を示すものの、発生する海洋熱波の空間分布の特徴には大きな変化を及ぼさないことがわかった。

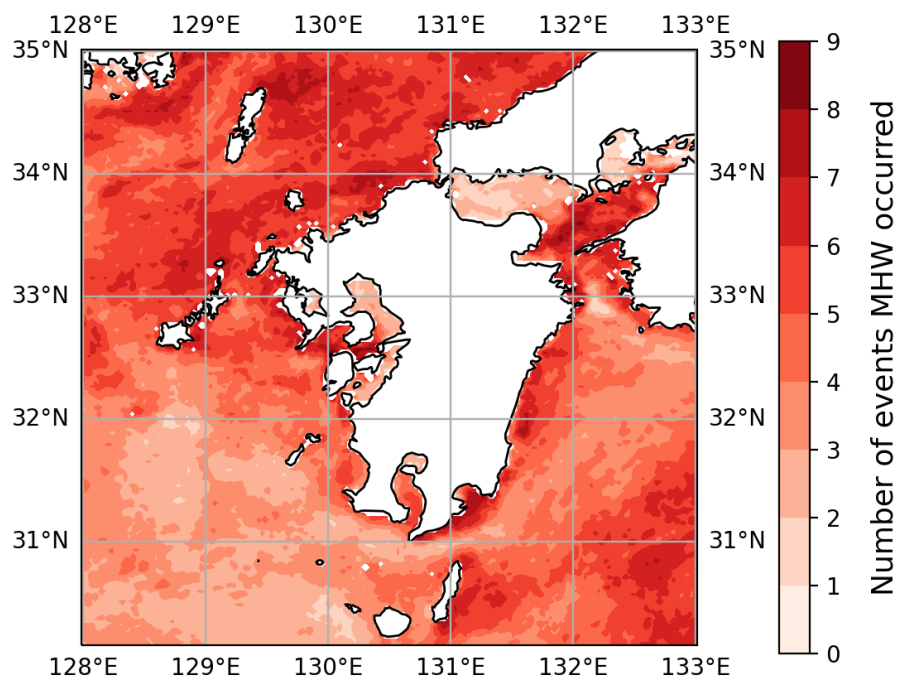


(a) 1月の海面水温

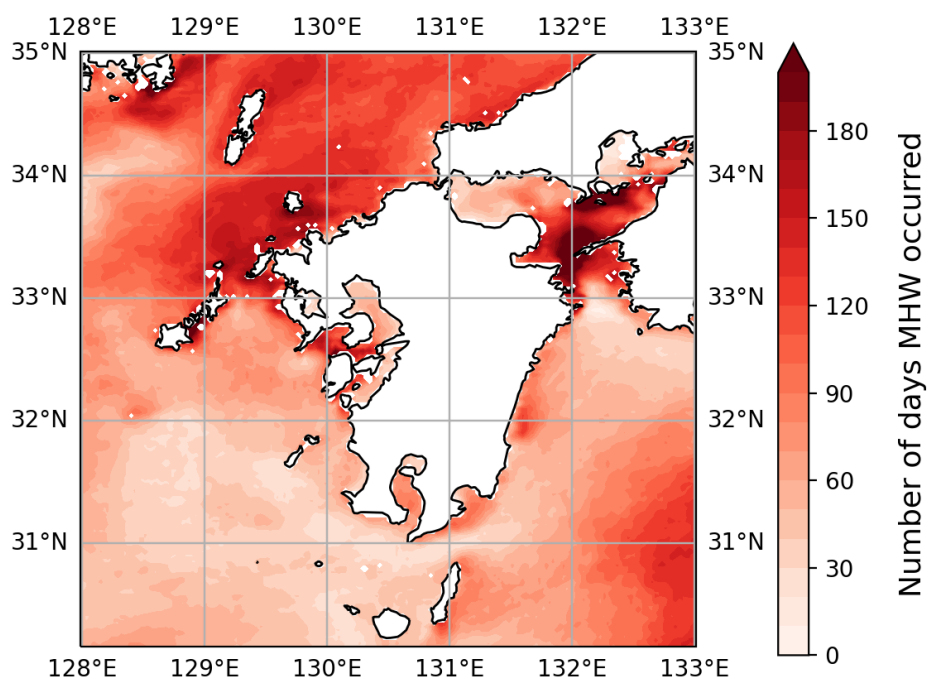


(b) 7月の海面水温

図 3.1 MODIS の日別海面水温から求めた(a)1月と(b)7月の月平均の気候値の空間分布。



(a) 平均発生回数



(b) 平均発生日数

図 3.2 バイアス補正前の 2019~2023 年の海洋熱波の 1 年あたり (a)平均発生回数と (a)平均発生日数の空間分布。

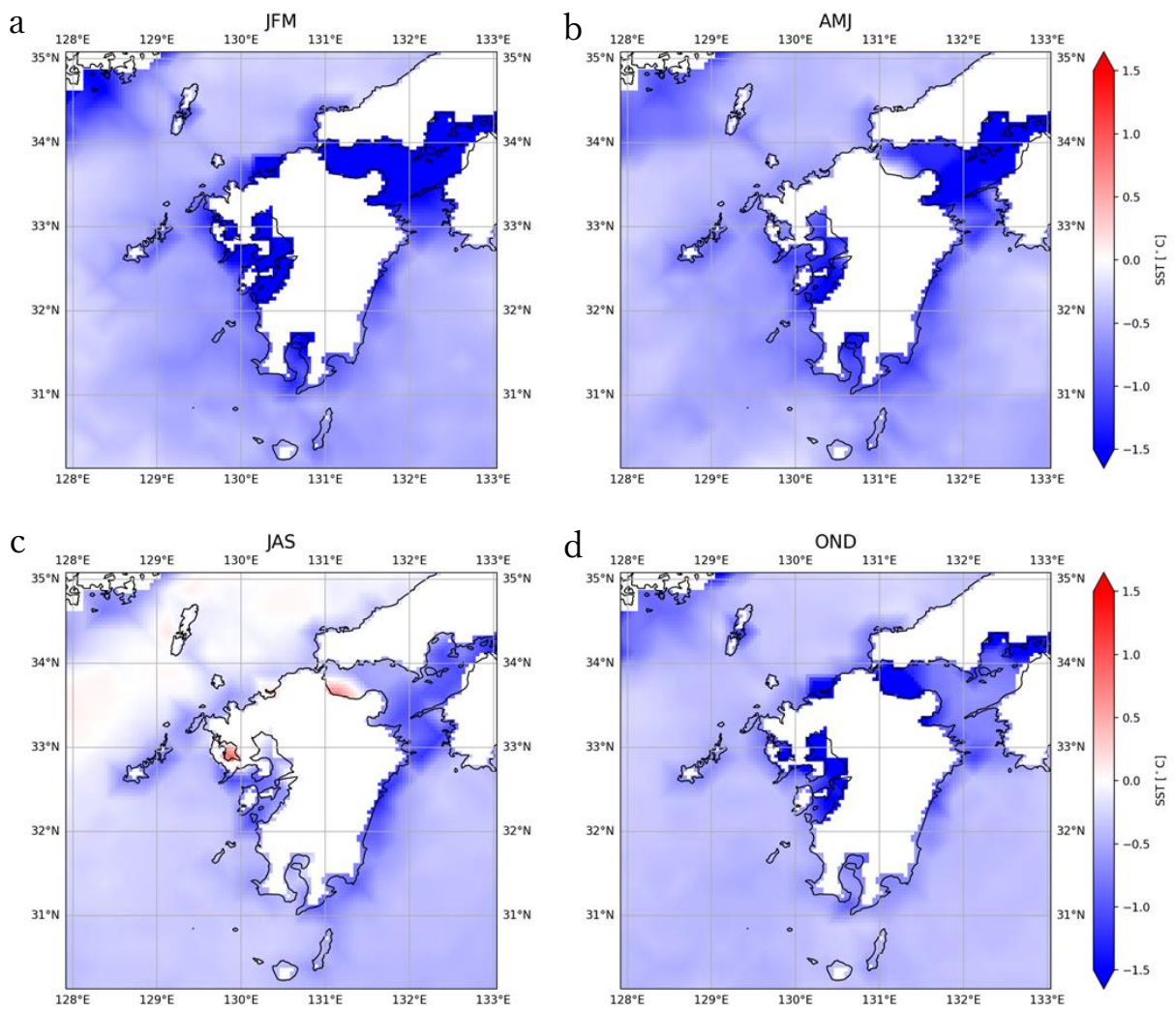
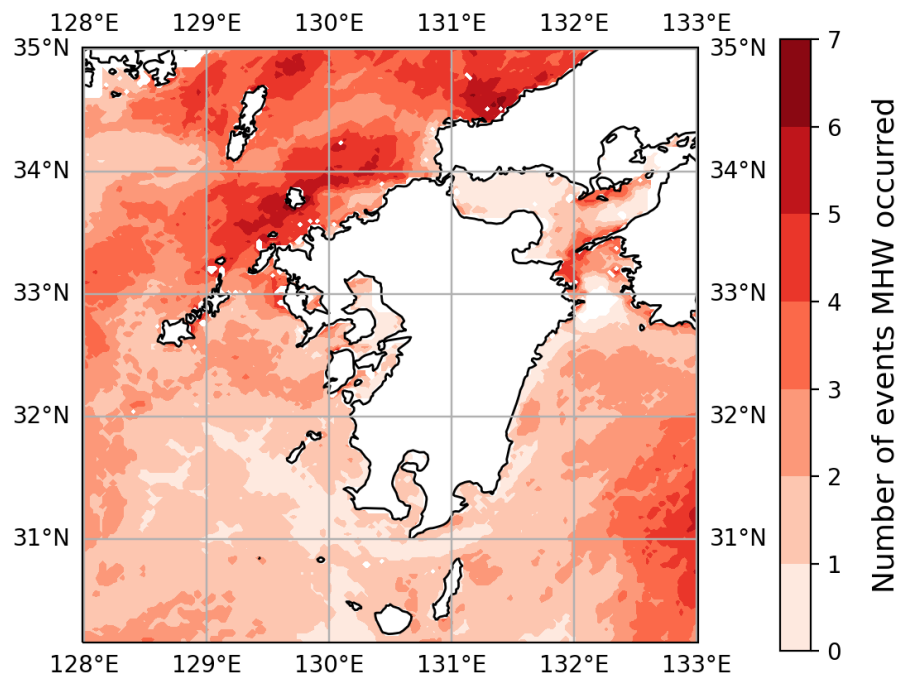
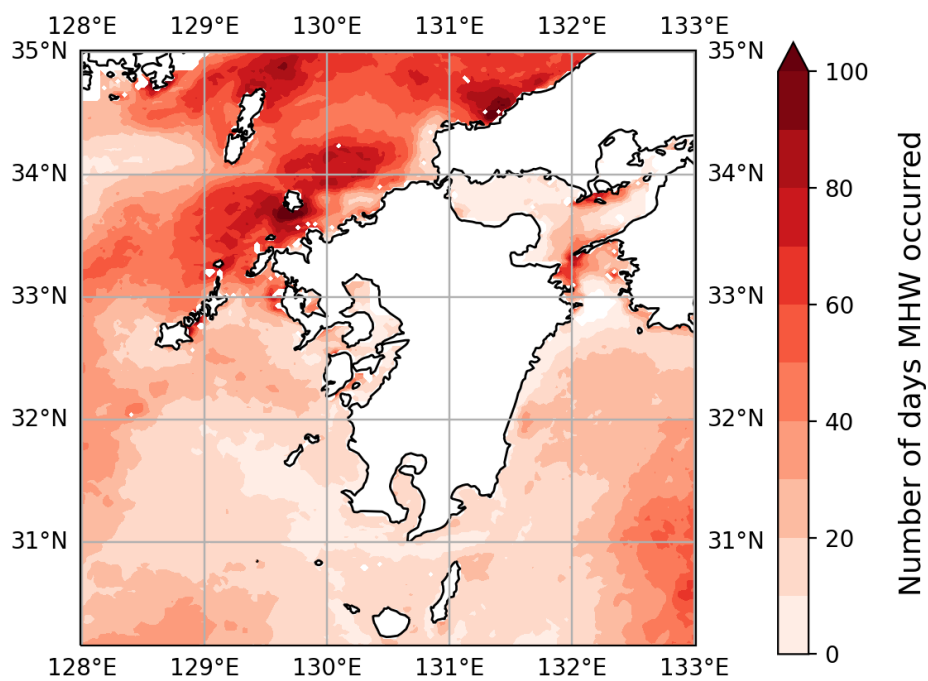


図 3.3 3 か月平均したバイアス値の空間分布。(a)JFM、(b)AMJ、(c)JAS、(d)OND。

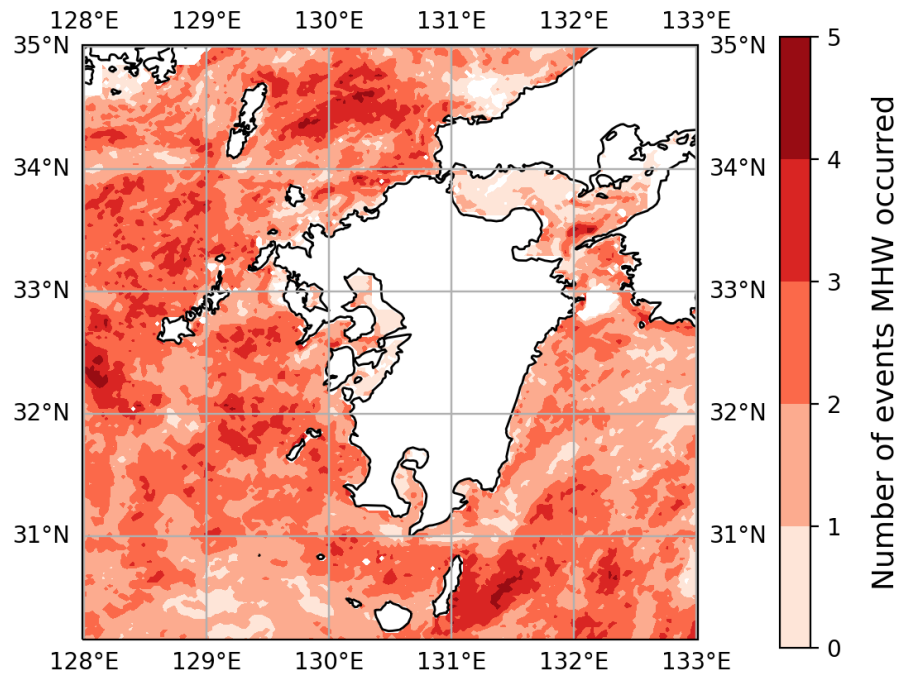


(a) 平均発生回数

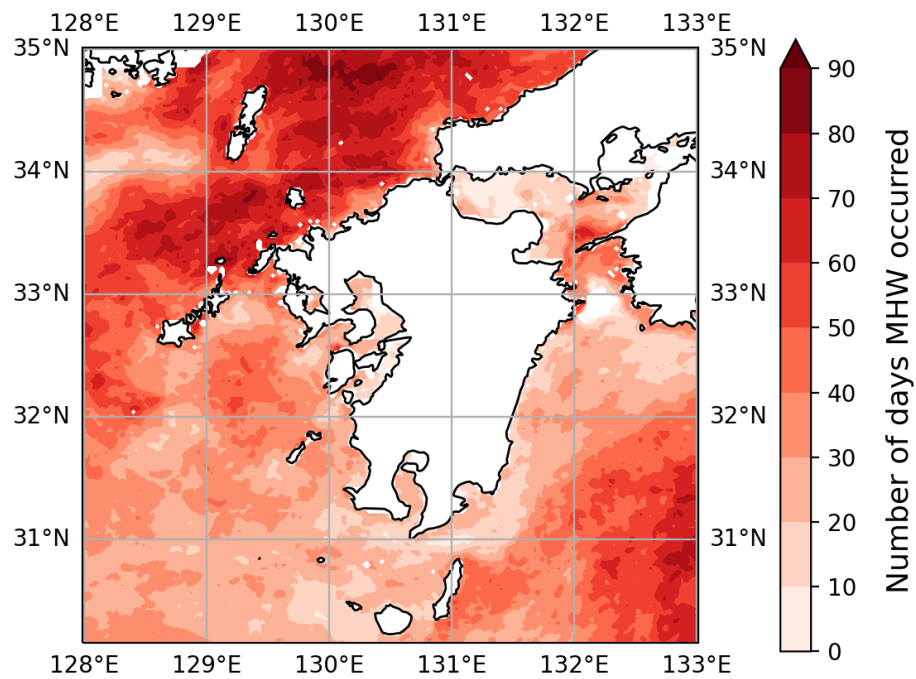


(b) 平均発生日数

図 3.4 バイアス補正後の 2019~2023 年の海洋熱波の 1 年あたり (a)平均発生回数と(b)平均発生日数の空間分布。

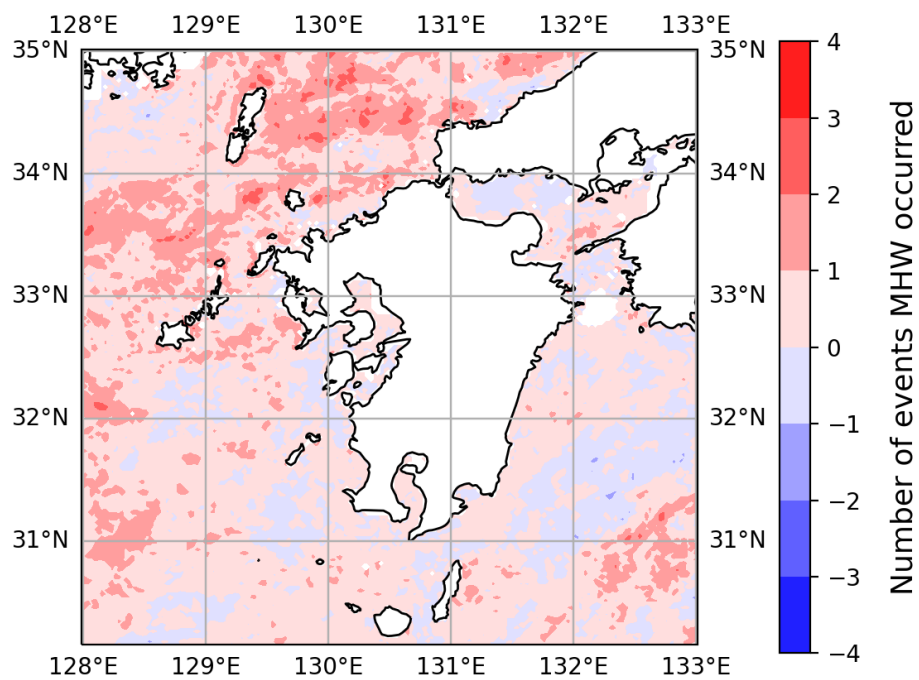


(a) 発生回数

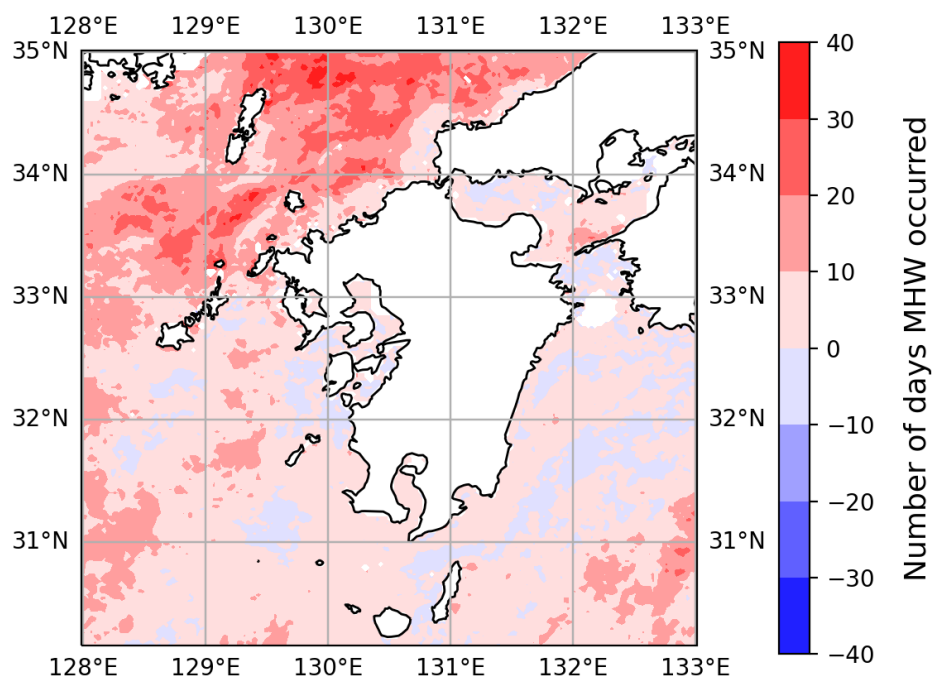


(b) 発生日数

図 3.5 80 パーセンタイル値と 90 パーセンタイル値を用いた際の海洋熱波の(a)発生回数と(b)発生日数の違い。差は (80 パーセンタイル) - (90 パーセンタイル) で算出した。



(a) 発生回数



(b) 発生日数

図 3.6 参照日数を前後 5 日と前後 45 日を用いた際の海洋熱波の(a)発生回数と(b)発生日数の違い。差は (前後 5 日) - (前後 45 日) で算出した。

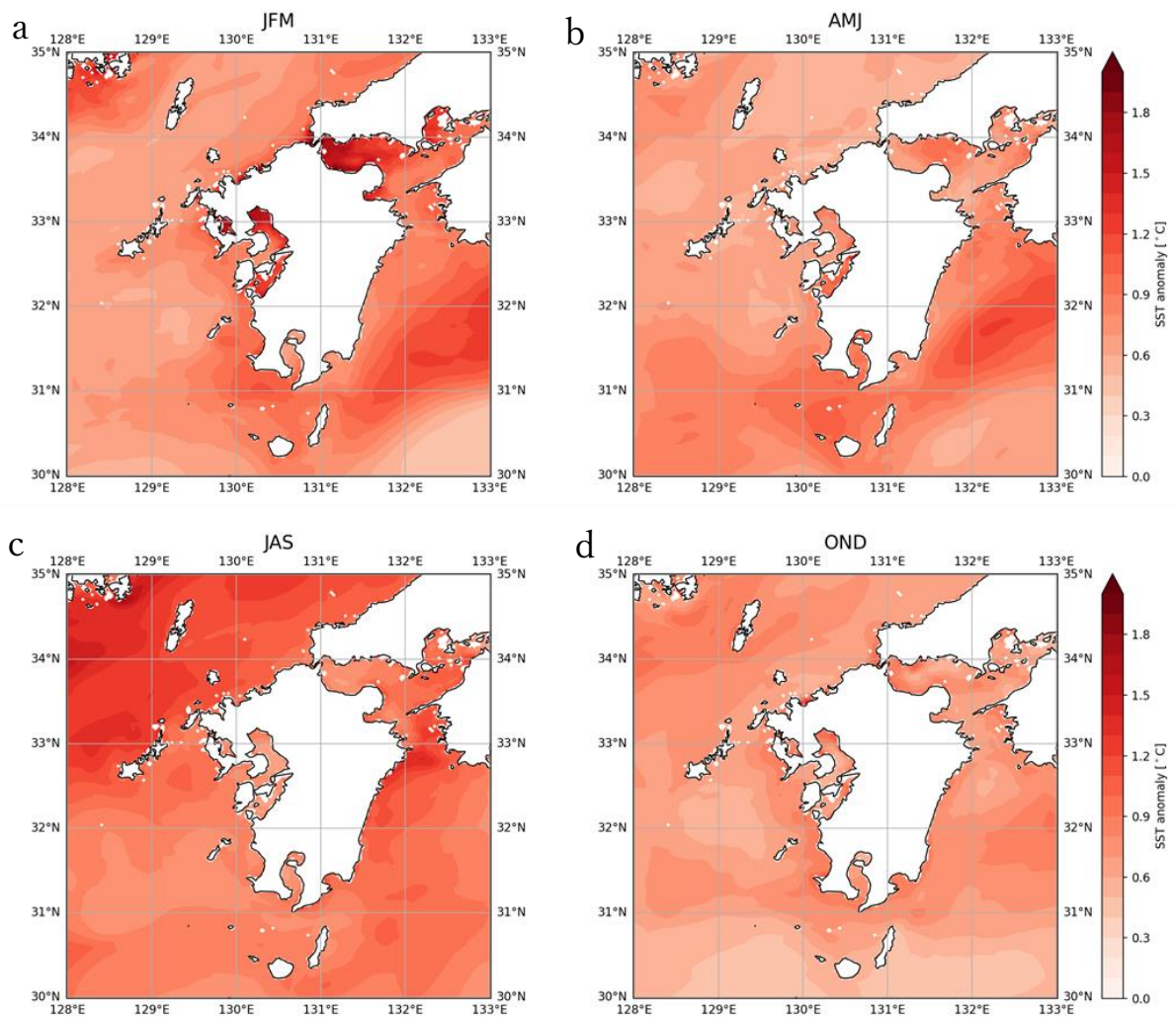


図 3.7 2019～2023 年の海面水温偏差の標準偏差の 3 か月平均。(a)JFM、(b)AMJ、(c)JAS、(d)OND。

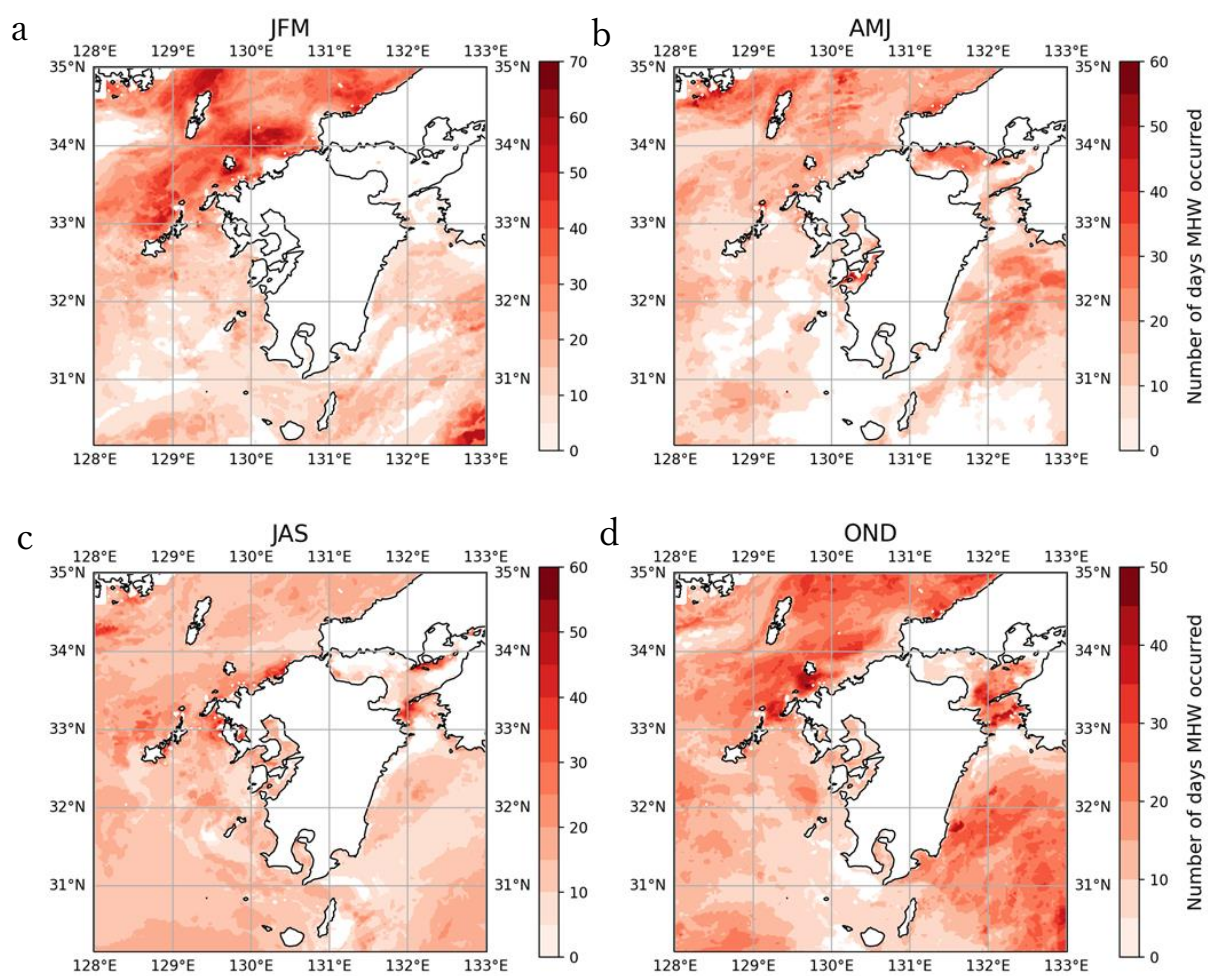


図 3.8 海洋熱波の発生回数と発生日数の 3 か月平均。(a)JFM、(b)AMJ、(c)JAS、(d)OND。

第4章 対馬海峡周辺における海洋熱波の特徴

本章では、九州周辺の海域の中で海洋熱波の発生回数と発生日数がともに多かった九州北部を対象に、2019～2023年に発生した海洋熱波の時間変化をより詳細に解析する。この海域で発生した海洋熱波の季節ごとの空間分布とその強度を示し、水深20 m・100 mにおける水温偏差との繋がりを調査する。

4.1 水温の時間変化

対馬海峡周辺で発生した2019～2023年の海洋熱波は、季節によって持続時間が大きく異なっていた(図4.1)。冬から春は、1か月から最大で4か月を超えるような長い期間で発生し、2019年、2020年、2022年、2023年と高い頻度で発生した。最も長かったのは2019～2020年にかけて124日間持続したものであり、海面水温は最大で2.5度、平均して1.4度程度、気候値を上回っていた。

夏は、持続時間が1週間から2週間程度と短い、ほかの季節よりも発生強度が大きいのが特徴である。2020年、2022年、2023年に発生しており、2020年7月に発生した海洋熱波は16日間持続し、海面水温は最大で3.3度、平均して2.4度程度、気候値を上回った。

秋は、台風が通過した際に鉛直混合によって海面水温が降下した後に海面水温が再上昇して発生し、1か月程度持続する。2021年と2023年に発生しており、2021年10月に発生した海洋熱波は36日間持続し、海面水温は最大で2.0度、平均して1.4度程度、気候値を上回った。

4.2 冬の海洋熱波の特徴

4.2.1 海面における水温偏差の空間分布

冬から春に発生した海洋熱波の特徴を明らかにするため、2019年11月から2020年3月にかけて2か月近く持続した海洋熱波に着目した。なかでも強い海洋熱波が確認された壱岐沖の時系列を確認したところ(図4.2a)、発生初期は閾値をわずかに超える程度の強さで発生していた。水温偏差は徐々に大きくなり1月で水温偏差が最大に達する。その後の水温偏差は緩やかに減少し、3月に海洋熱波が終息した。

海面水温偏差の空間分布は、海洋熱波の初期は対馬海峡周辺から天草にかけて発生していたことを示していた(図4.2b)。ただし有明海に見られる強い水温低下を伴う偏差は、海岸線に囲まれた海域でありバイアス補正の影響によるもので、海洋寒波が発生したものではないと推察される。水温偏差が最大に達した1月は、五島列島から対馬海峡の広い範囲で発生しており(図4.2c)、3月の終息時期(図4.2d)になると海洋熱波は主に対馬海峡の東側にある。つまり、海洋熱波は西から東に移動するように発生していたことがわかる。

4.2.2 海中における水温偏差の空間分布

次に、海面で海洋熱波が発生した際の対馬海峡の水深20 m・100 mにおける水温の時系列も調べた

ところ、初期は水深 20 m・100 m の水温はほぼ気候値と同じ値であったが、12 月頃から上昇し、海洋熱波のピーク時には気候値と比べて高い水温偏差を示していた（図 4.3a、図 4.3b）。海面水温と比べると水温偏差の大きさは水深が浅いほど大きいものの、水深 100 m でも 1～2 度の水温偏差が広く分布している（図 4.4a、図 4.4b）。よって、この海域で冬に発生する海洋熱波は、海面に限定された海洋熱波ではなく、水中深くまで温められた海水の移流によって引き起こされている可能性が高い。

4.3 夏の海洋熱波の特徴

4.3.1 海面における水温偏差の空間分布

夏の発生する海洋熱波の特徴を明らかにするため、2022 年 7 月に発生した海洋熱波に着目した。冬と同様に壱岐沖の海面水温の時間変化を確認したところ、海洋熱波の発生初期（7 月初め頃）に、1 週間で水温偏差が最大に達していた（図 4.5a）。その後、水温は閾値をすぐ下回った。水温偏差の空間分布は、海洋熱波の初期は水温偏差の大きい福岡から長崎の沿岸近くに集中していたことを示していた（図 4.5b）。しかし、海洋熱波のピーク時は、九州から韓国沿岸まで広い範囲で発生しており、水温偏差もおよそ 3 度である（図 4.5c）。終息時期は、発生初期と同様に福岡から長崎の沿岸近くに海洋熱波が発生している一方、水温偏差は対馬海峡部でも確認できた（図 4.5d）。夏の海洋熱波は水深の浅い沿岸近くで発生し、広範囲に広がったのち再び沿岸近くで収束する傾向があった。

4.3.2 海中における水温偏差の空間分布

冬と同様に海面で海洋熱波が発生した期間の対馬海峡の水深 20 m・100 m における水温の時間変化を調べたところ、水深 20 m では海洋熱波の発生中も正の水温偏差が存在することがわかった。しかし海面のように水温偏差が海洋熱波の発生前後と比べて大きく上昇していないことから海洋熱波と直接関係がないことが推測される（図 4.6a）。さらに水深 100 m では水温が気候値とほぼ同じである（図 4.6b）。水温偏差の空間分布も、深さ 20 m では海洋熱波が発生している海域で正の水温偏差を示した（図 4.7a）。一方、水深 100 m では、大きい水温偏差は存在しない（図 4.7b）。夏に発生する海洋熱波は、海面近くに集中して発生する傾向がある。

4.4 秋の海洋熱波の特徴

4.4.1 海面における水温偏差の空間分布

秋に発生する海洋熱波の特徴を明らかにするため、2021 年 10 月に発生した海洋熱波に着目した。これまでと同様に壱岐沖の海面水温の時間変化を確認したところ、海洋熱波は 9 月に通過した台風に伴って水温が降下した約 2 週間後の 10 月初めに発生したことがわかった（図 4.8a）。台風通過後に 2 週間ほどかけて水温偏差が上昇していることが確認でき、海洋熱波は 2 週間ほど持続したのち、11 月に終息した。空間分布は、海洋熱波が発生初期から対馬海峡の広い範囲で発生していたこと（図 4.8b）、そして

ピーク時にはほぼ対馬海峡の全域へと広がっていたこと（図 4.8c）を示していた。水温偏差は全域で 2.5 度ほどある。終息時期には、海洋熱波と高い水温偏差の海域が対馬海峡の東側にあり（図 4.8d）、これは冬から春に発生した海洋熱波のように対馬海峡を西から東へと移動していることが示唆される。

4.4.2 海中における水温偏差の空間分布

秋の海洋熱波についても対馬海峡の水深 20 m・100 m における水温の時間変化を調べたところ、水深 20 m では水温偏差が台風に伴う水温の降下後から海洋熱波が収束するまで、海面と同様の時間変化を示した（図 4.9a）。一方、水深 100 m では台風による水温降下は確認できたものの変動が小さく、海面のような水温上昇は見られず、逆に水温低下している時期もあった（図 4.9b）。

空間分布も水深 20 m では海面とよく似た正の水温偏差が確認でき（図 4.10a）、その大きさは 1.5～2.5 度で海面とほぼ一致している。一方、水深 100 m では正の水温偏差が確認できず、対馬海峡の周辺では負の水温偏差が存在した（図 4.10b）。つまり、台風通過後に確認された水温上昇は、水中深くまでは到達していなかったことが推察される。

4.5 考察

海洋熱波の形成要因を大きく分けると、大気による加熱効果と海洋による移流効果の二つが挙げられる。そこで、海洋熱波の発生初期と終息時期の空間分布を九州周辺の海域に範囲を広げて確認し、対馬海峡周辺で発生する海洋熱波の要因を考察する。

冬から春は、海洋熱波の初期は対馬海峡から東シナ海側にかけて発生していたものの（図 4.11a）、終息時期には日本海寄りの海域で発生していた（図 4.11b）。冬の海洋熱波は水深 100 m まで温められた海水が存在していたことから、東シナ海側から移流する温められた海水が、冬の海洋熱波発生に重要な要素であると考えられる。

夏の海洋熱波の初期は、水深の浅い九州北部から山口北部にかけて沿岸近くで発生しており、東シナ海側では確認できなかった（図 4.12a）。終息時期の分布も同様である（図 4.12b）。また大気によって海面付近の海水が温められることで海洋熱波が発生しており、水深の浅い沿岸近くを中心に持続時間が長くなったことが考えられる。このことは夏の混合層が薄く、水深 20 m の水温偏差が大きくなかったこととも一致する。

秋に発生した海洋熱波は、台風の通過後に対馬海峡の東シナ海側で発生し、日本海側で終息した（図 4.13a、4.13b）。これは、冬と同様に対馬暖流の影響が大きいことを示唆している。しかし、冬の海洋熱波とは異なり水温偏差が水深 100 m まで到達していなかったことから、秋の海洋熱波は、冬と比べて薄く、より海面混合層に限定されやすいことが示唆される。水深の浅い海域ではメキシコ湾で熱帯低気圧の通過後に発生した海洋熱波と似た傾向がある可能性があるが(Dzwonkowski et al., 2020)、混合層が海底まで到達しない水深の深い海域では、異なるメカニズムで海洋熱波が発生していたと推測される。

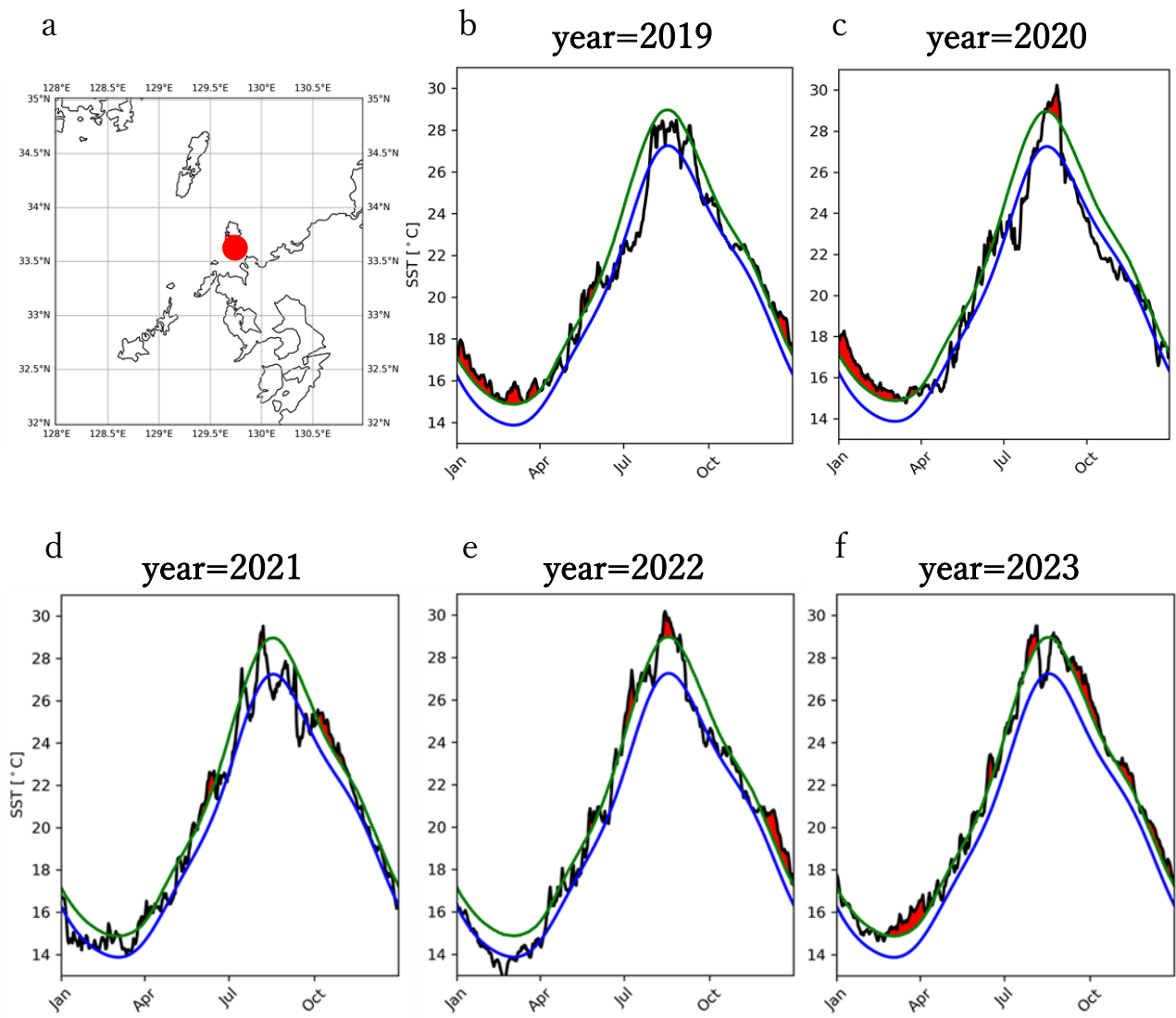


図 4.1 (a)九州北西部。海面水温の時間変化を示す壱岐沖が赤丸の点である。(b)2019、(c)2020、(d)2021、(e)2022、(f)2023。赤で塗りつぶされた領域が海洋熱波の期間である。黒線は日別海面水温、青線は気候値、緑線は閾値を示す。

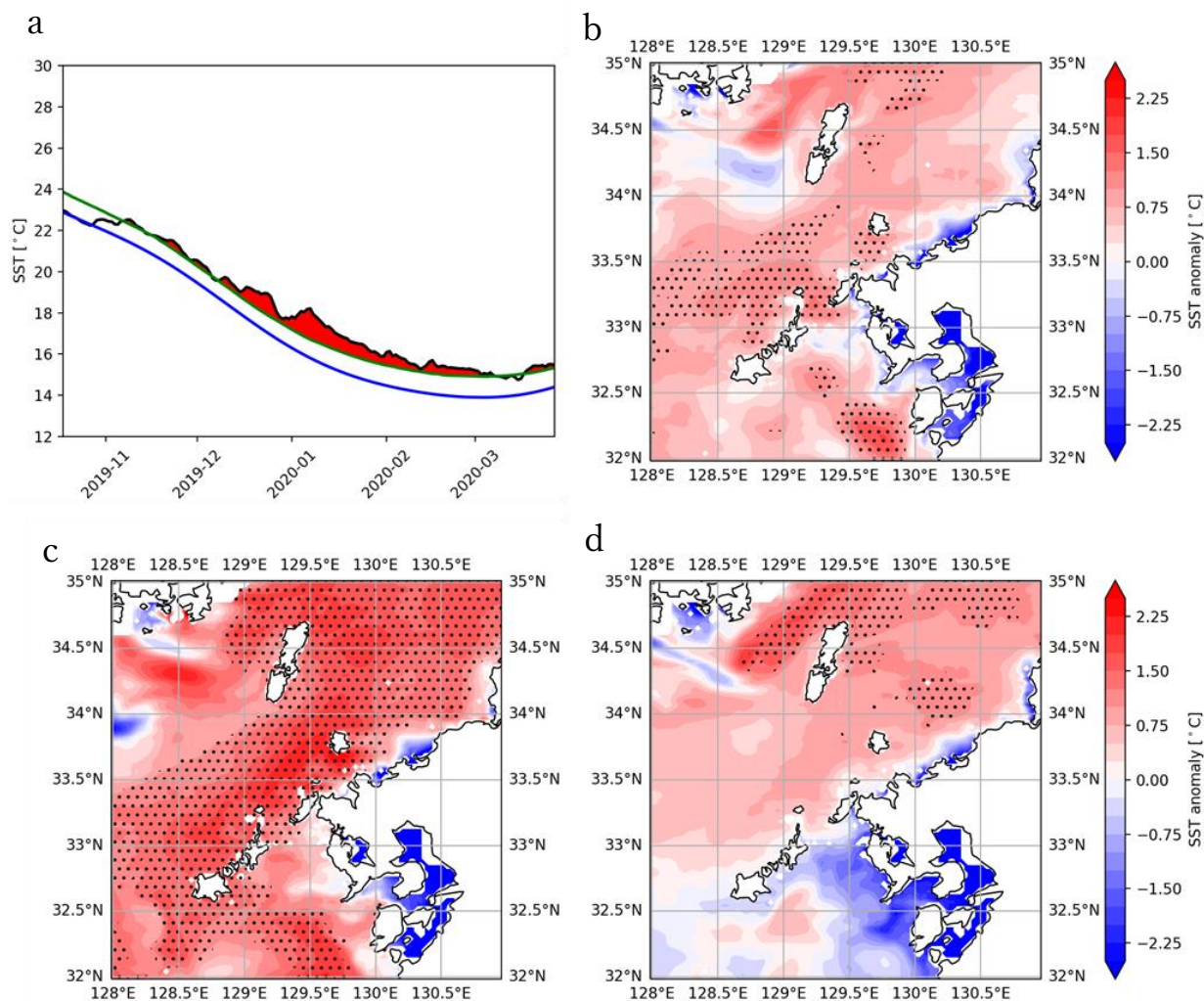


図 4.2 (a)は 2019 年 11 月から 2020 年 3 月にかけて海洋熱波が発生した期間の壱岐沖（図 4.1a の赤丸）の海面水温の時間変化。赤で塗りつぶされた領域が海洋熱波の期間である。黒線は日別海面水温、青線は気候値、緑線は閾値を示す。(b)海洋熱波の発生初期(2019/12/04)、(c)水温偏差が最大に達した時期(2020/01/07)、(d)海洋熱波の終息時期(2020/03/16)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

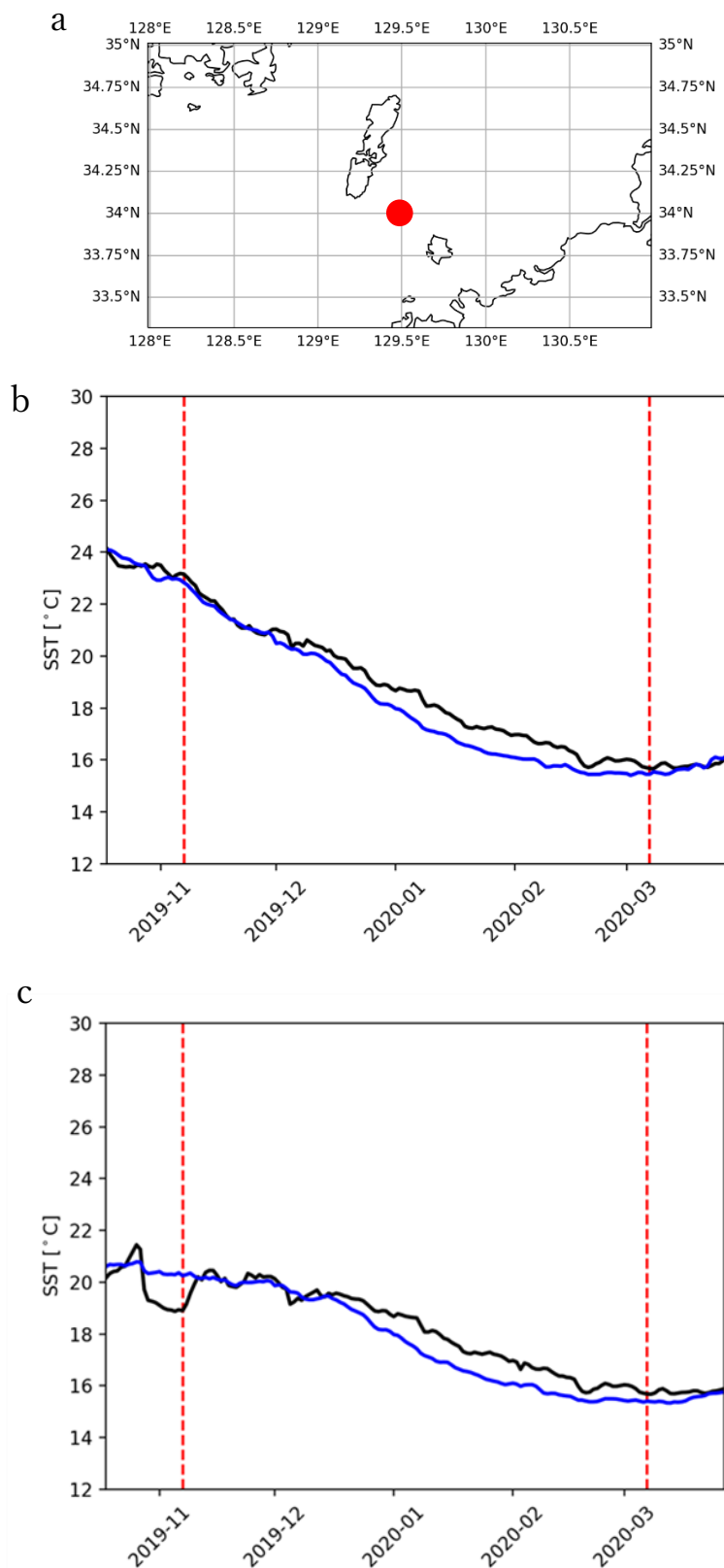
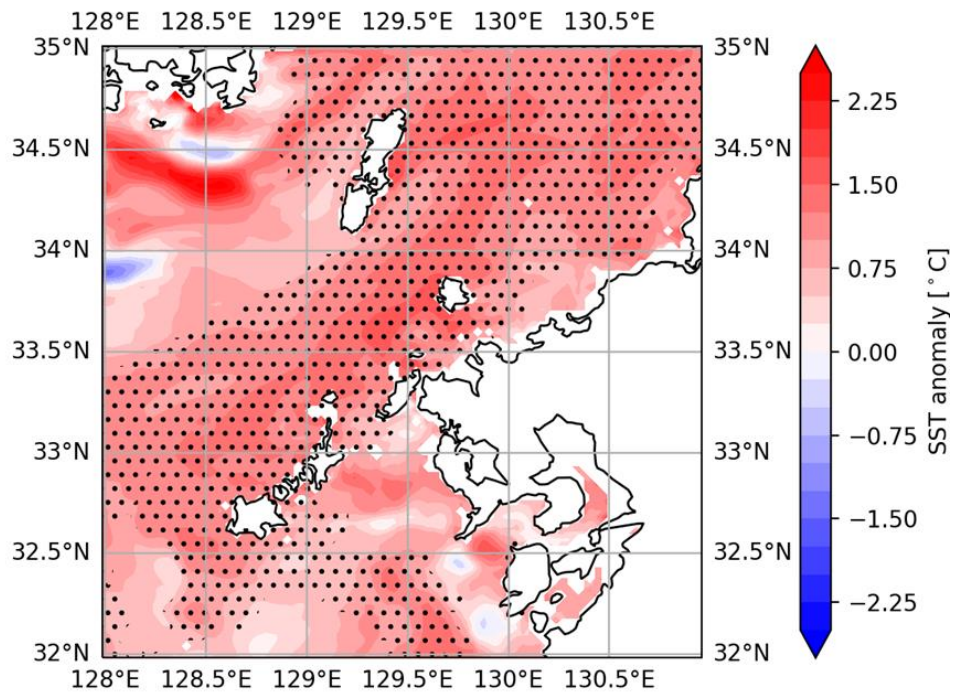
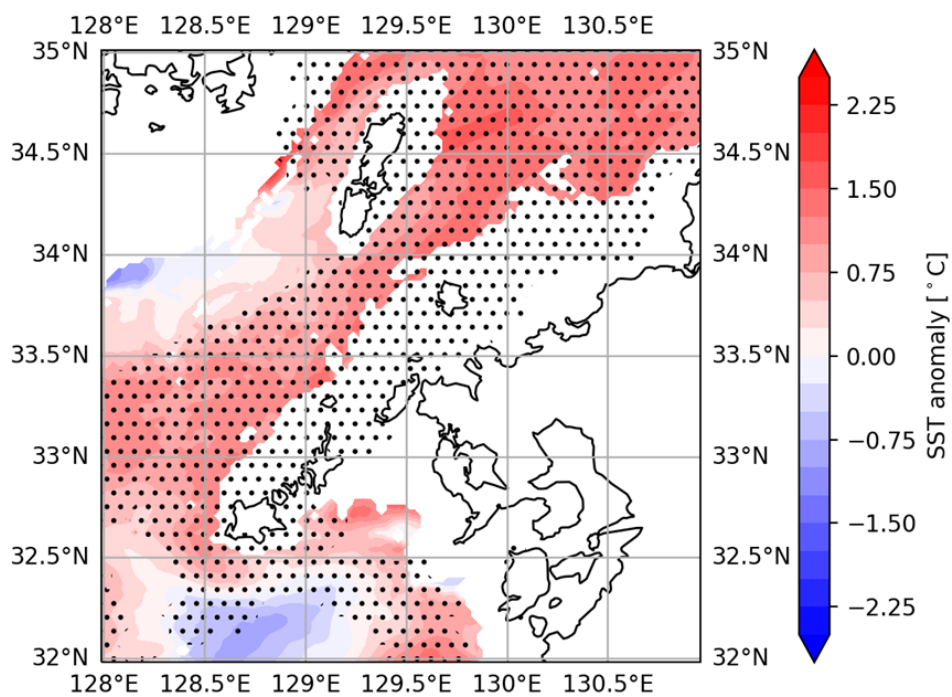


図 4.3 (a)九州北西部。海面水温の時間変化を示す対馬海峡が赤丸の点。2019 年 11 月から 2020 年 3 月にかけて発生した海洋熱波の(b)水深 20 m、(c)水深 100 m における水温の時間変化。黒線が日別水温、青線が 2019～2023 年の水温の平均値を示す。赤の点線は海洋熱波の始まりと終わりの日にちを示す。



(a) 水深 20m



(b) 水深 100m

図 4.4 2019 年 11 月から 2020 年 3 月にかけて発生した海洋熱波のピーク時(2020/01/07)の(a)水深 20 m、(b)水深 100 m の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

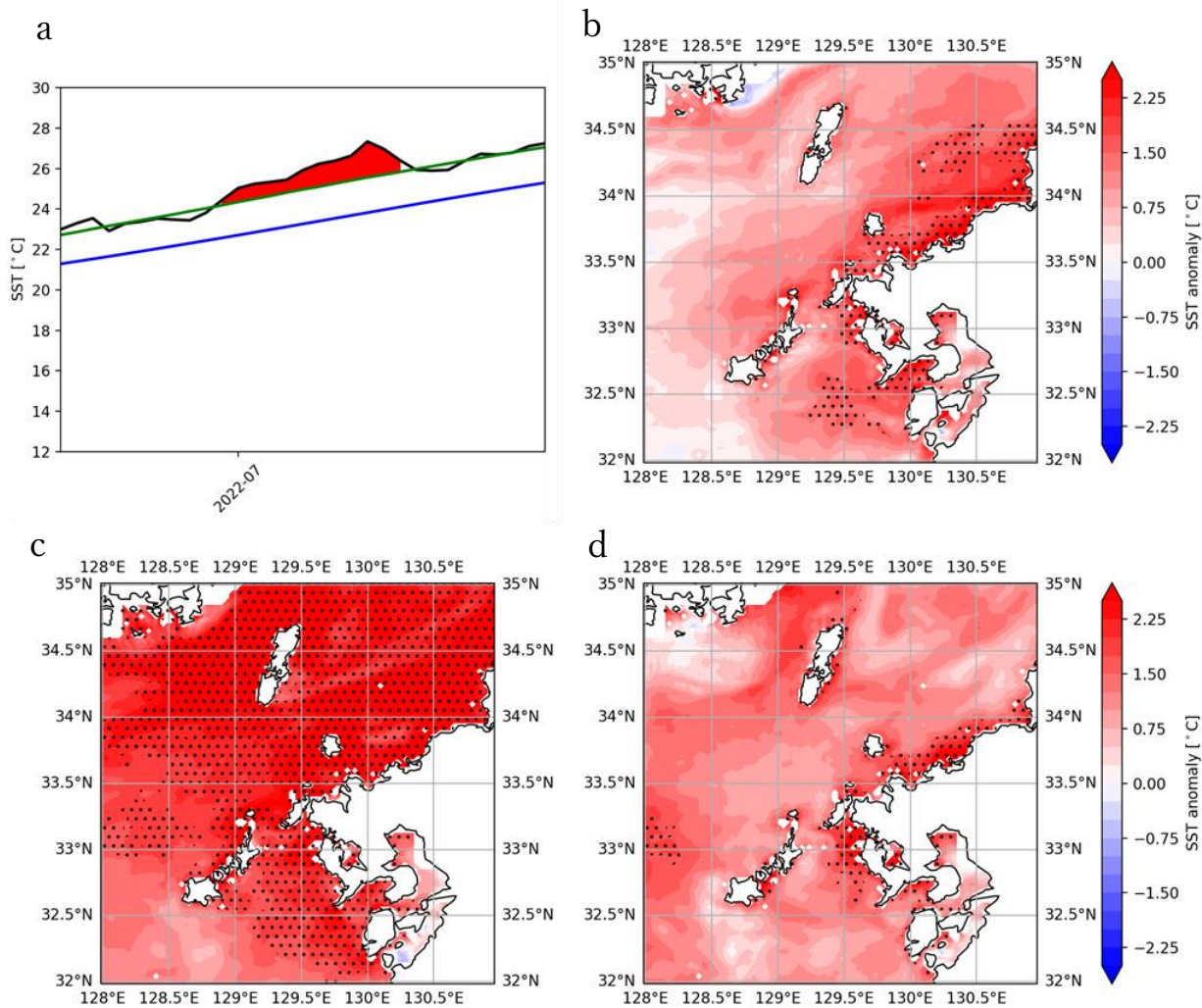
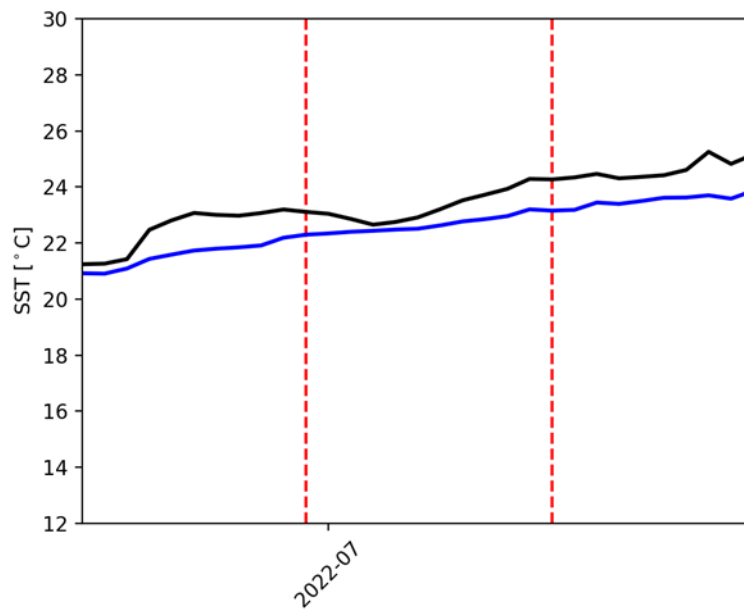
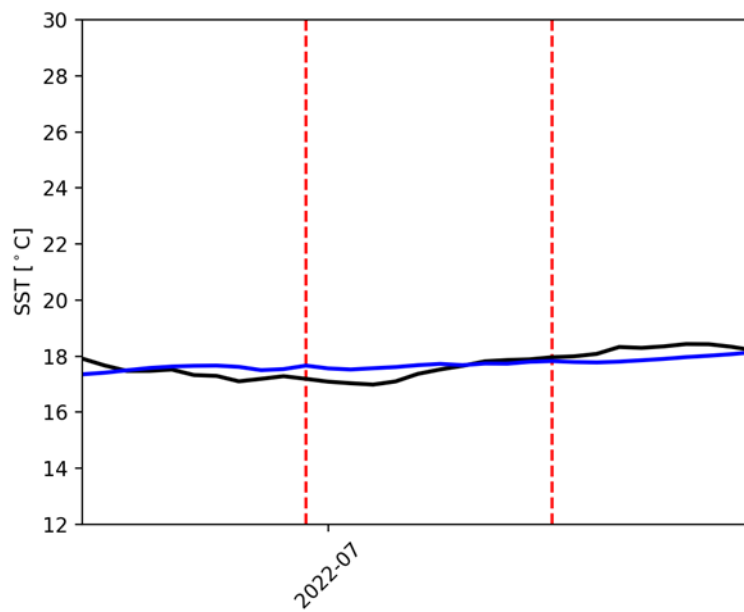


図 4.5 (a)は 2022 年 7 月に海洋熱波が発生した期間の壱岐沖(図 4.1a の赤丸)の海面水温の時間変化。赤で塗りつぶされた領域が海洋熱波の期間である。黒線は日別海面水温、青線は気候値、緑線は閾値を示す。(b)海洋熱波の発生初期(2022/06/30)、(c)水温偏差が最大に達した時期(2022/07/08)、(d)海洋熱波の終息時期(2022/07/12)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。



(a) 水深 20m



(b) 水深 100m

図 4.6 2022 年 7 月に発生した海面水温の対馬海峡（図 4.3a の赤丸）の(a)水深 20 m、(b)水深 100 m の水温の時間変化。黒線が日別水温、青線が 2019～2023 年の水温の平均値を示す。赤の点線は海洋熱波の始まりと終わりの日にちを示す。

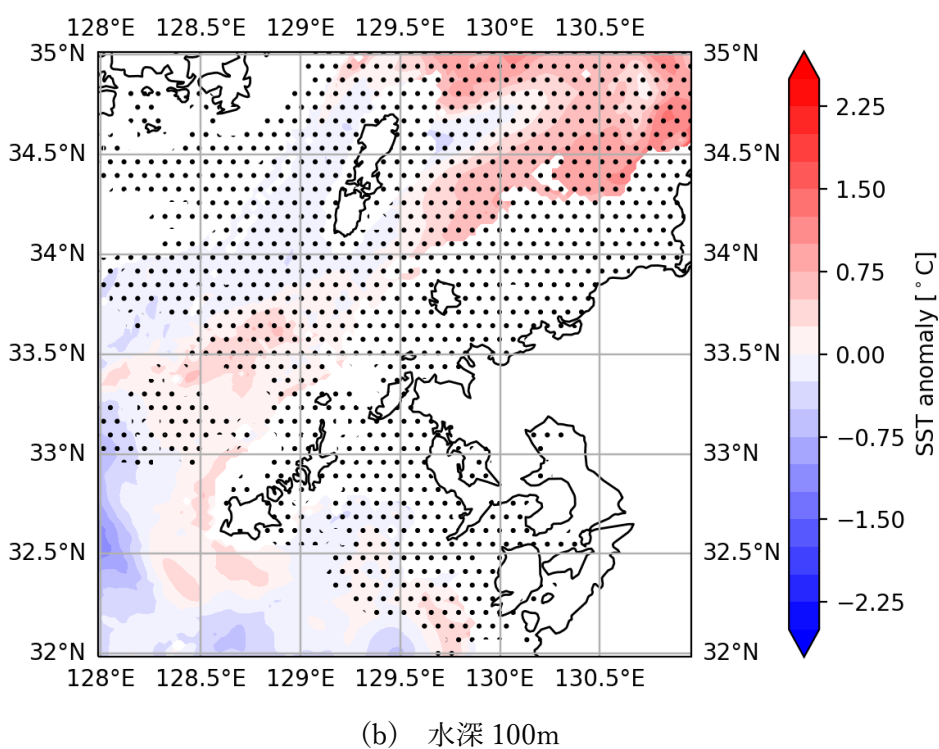
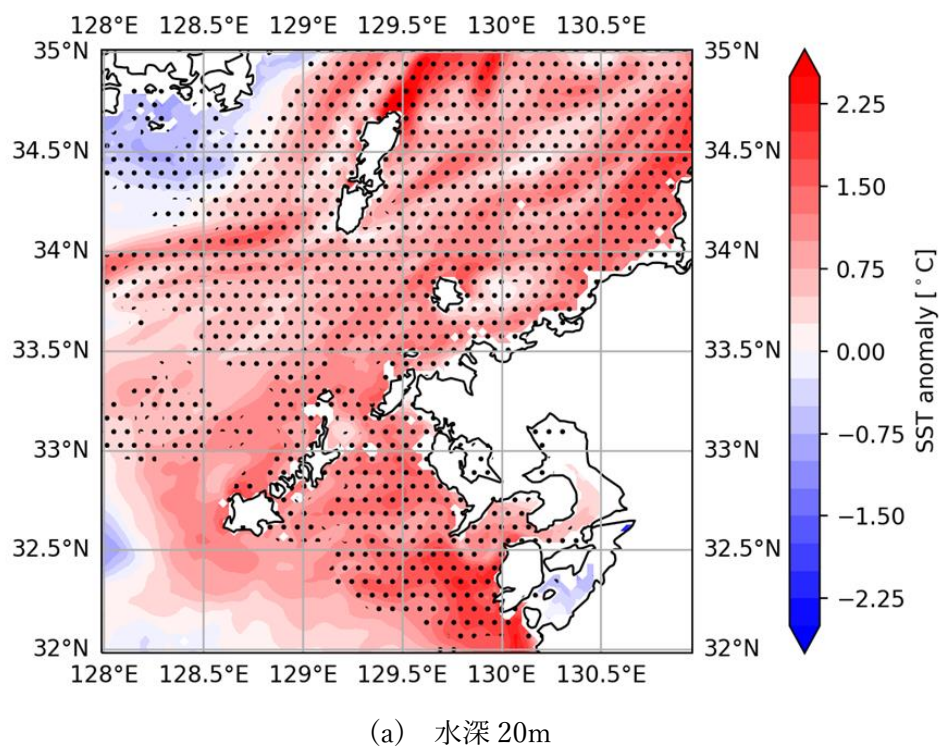


図 4.7 2022 年 7 月に発生した海洋熱波のピーク時(2022/07/08)の(a)水深 20 m、(b)水深 100 m の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

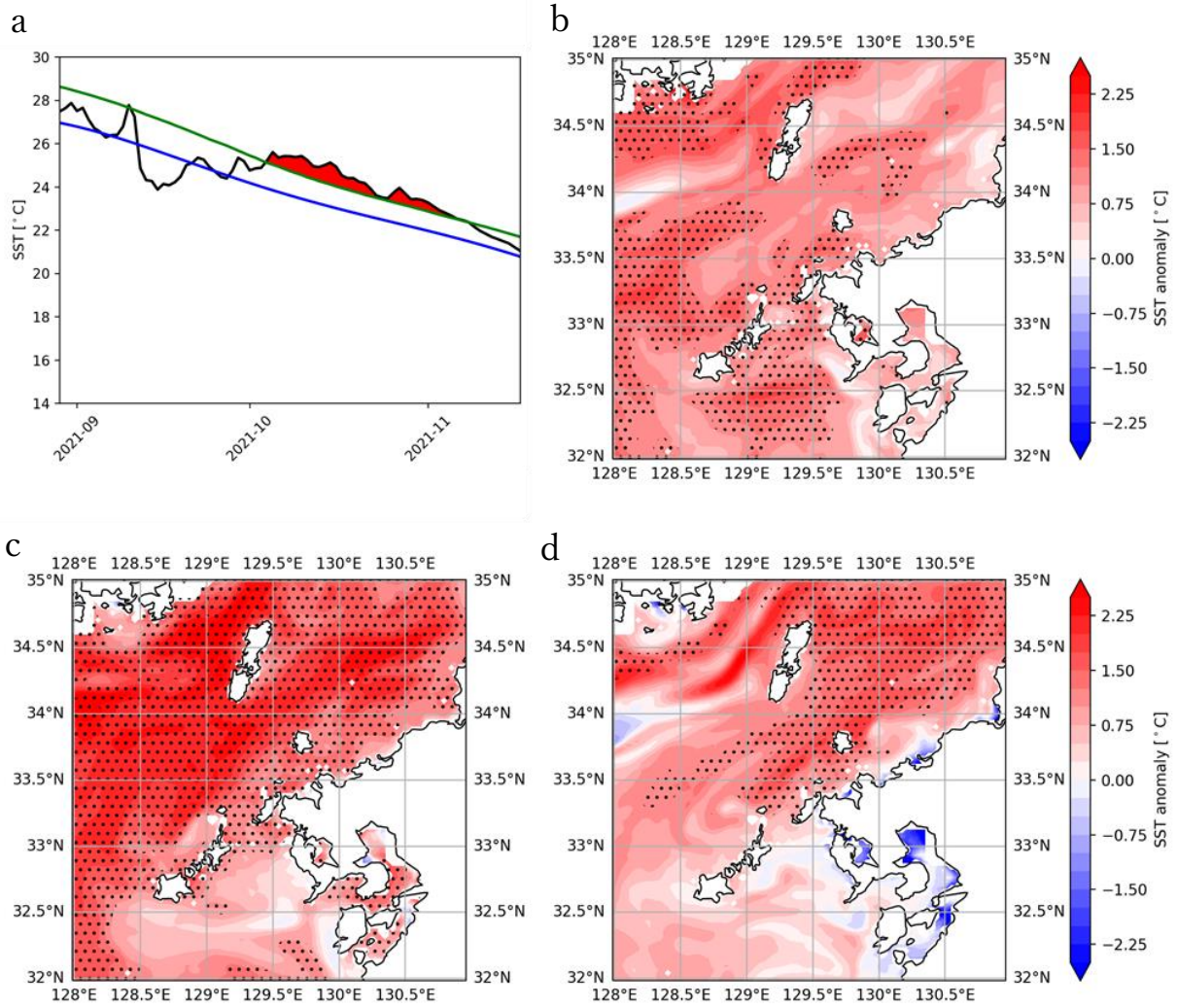
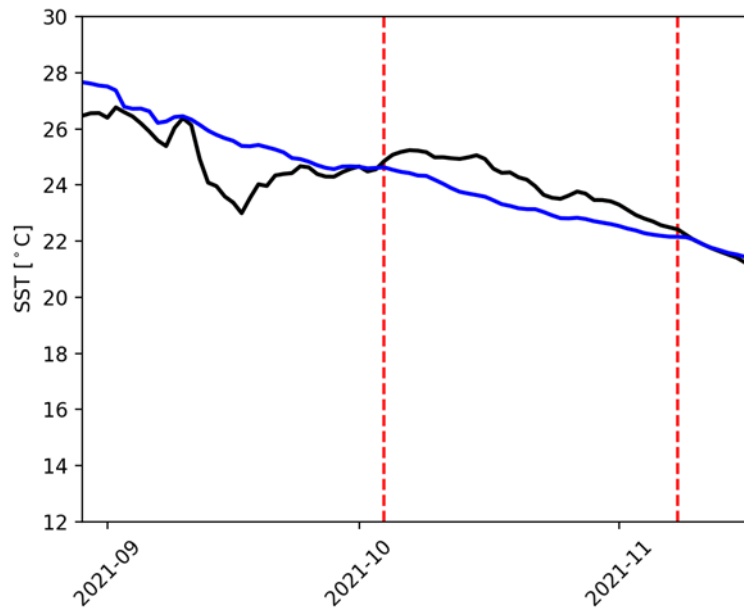
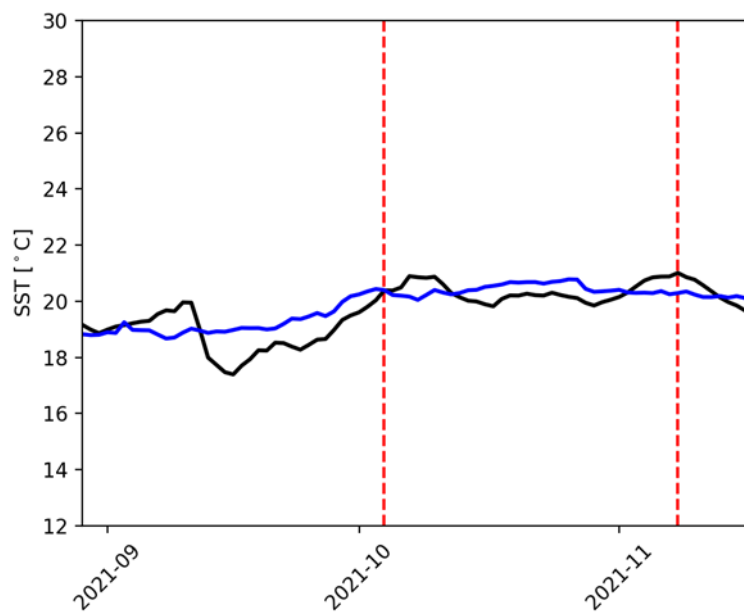


図 4.8 (a)は 2021 年 10 月に海洋熱波が発生した期間の壱岐沖(図 4.1a の赤丸)の海面水温の時間変化。赤で塗りつぶされた領域が海洋熱波の期間である。黒線は日別海面水温、青線は気候値、緑線は閾値を示す。(b)海洋熱波の発生初期(2021/10/04)、(c)水温偏差が最大に達した時期(2021/10/18)、(d)海洋熱波の終息時期(2021/10/28)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

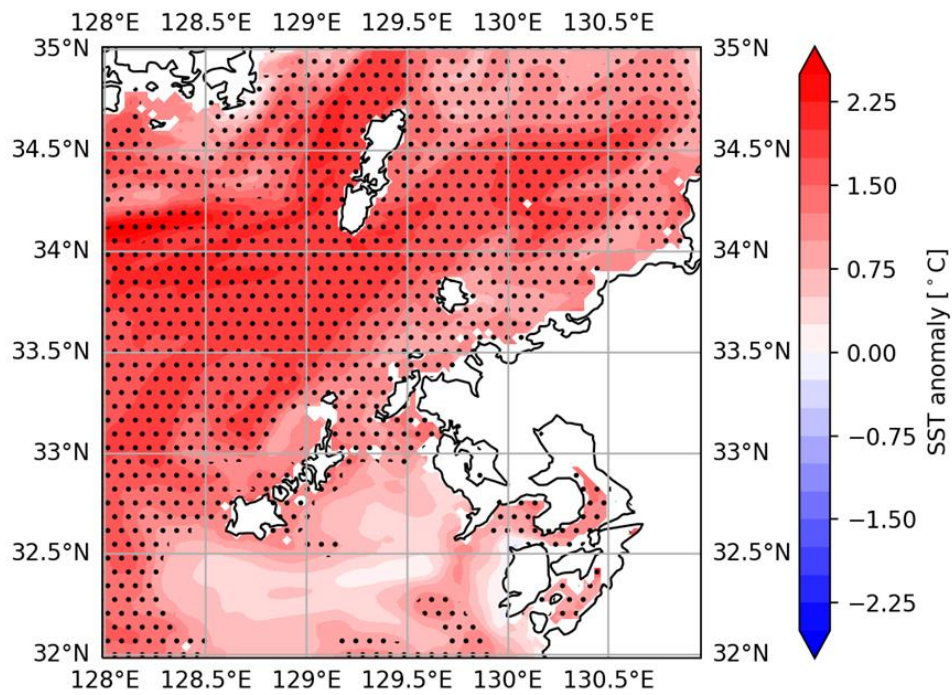


(a) 水深 20m

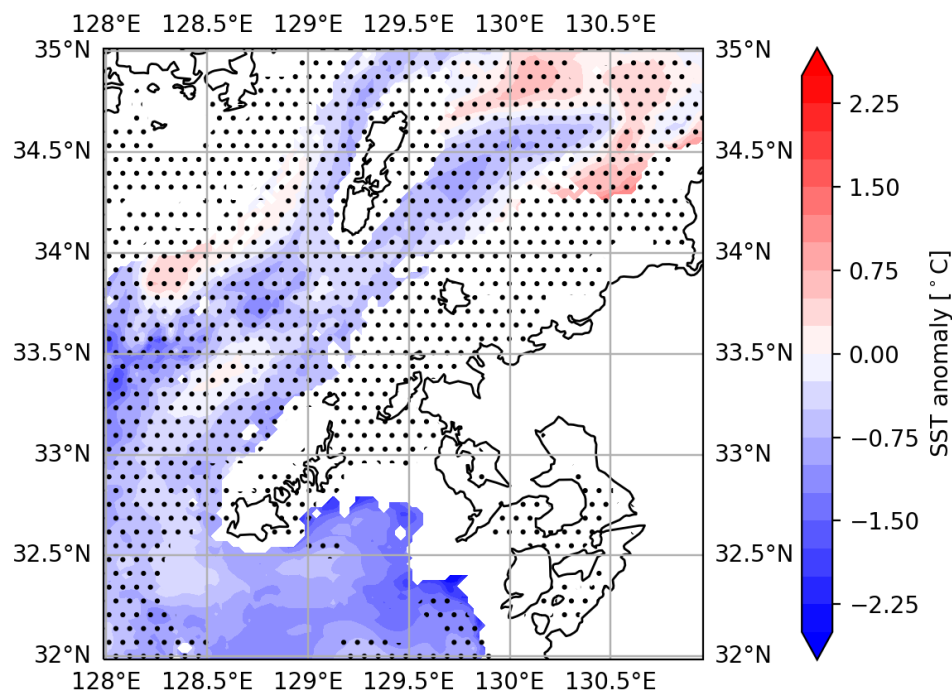


(b) 水深 100m

図 4.9 2021 年 10 月に発生した海洋熱波の対馬海峡（図 4.3a の赤丸）の(a)水深 20 m、(b)水深 100 m の水温の時間変化。黒線が日別水温、青線が 2019～2023 年の水温の平均値を示す。赤の点線は海洋熱波の始まりと終わりの日にちを示す。

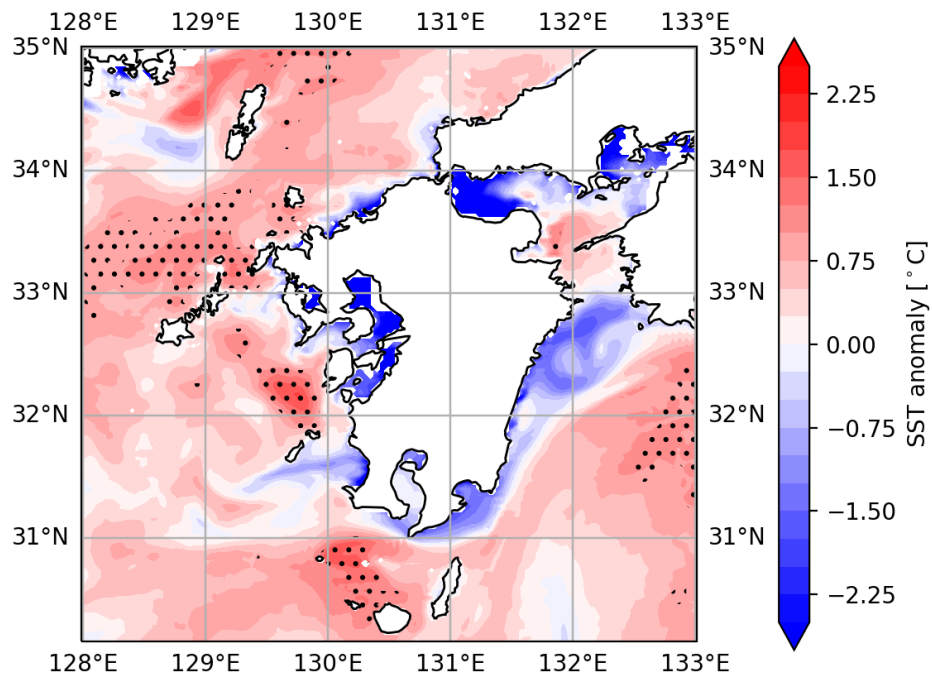


(a) 水深 20m

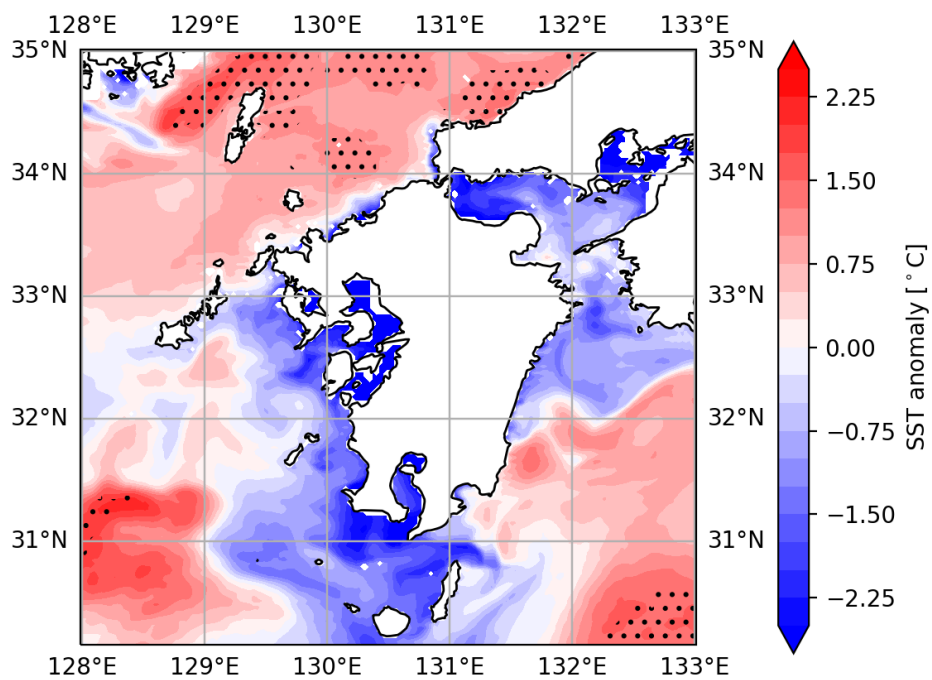


(b) 水深 100m

図 4.10 2021 年 10 月に発生した海洋熱波のピーク時 (2021/10/18)の(a)水深 20 m、(b)水深 100 m の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

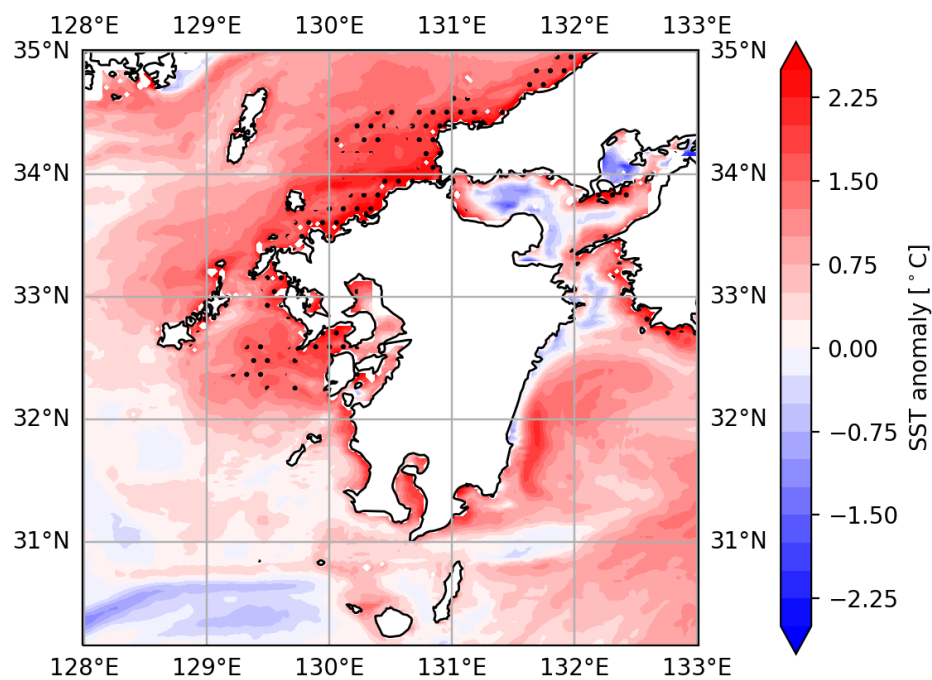


(a) 発生初期

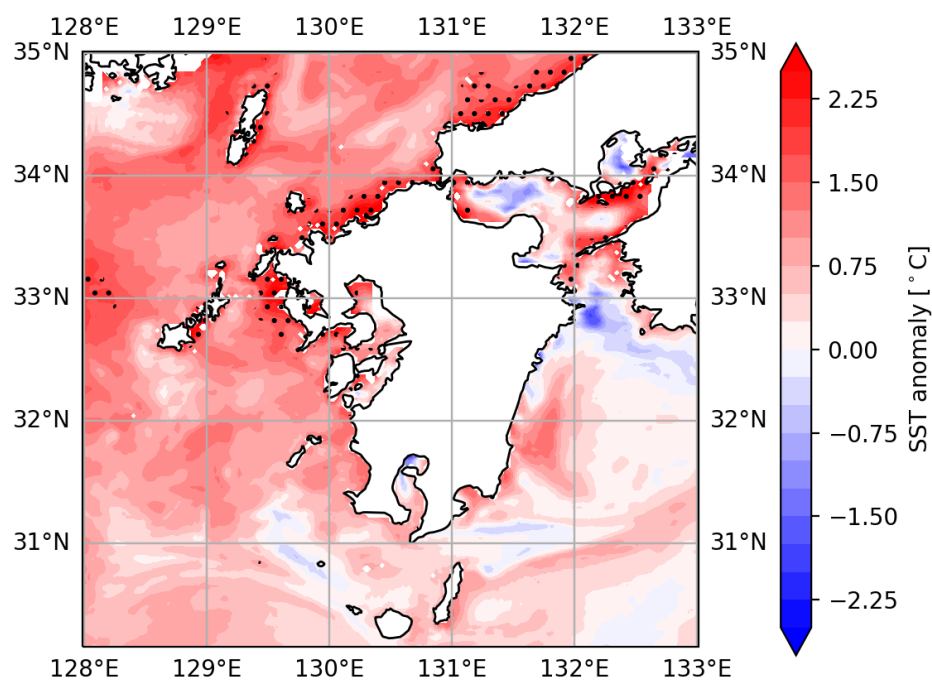


(b) 終息時期

図 4.11 2019 年 11 月から 2020 年 3 月にかけて発生した海洋熱波の (a)発生初期(2019/12/04)、(b)終息時期(2020/03/16)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

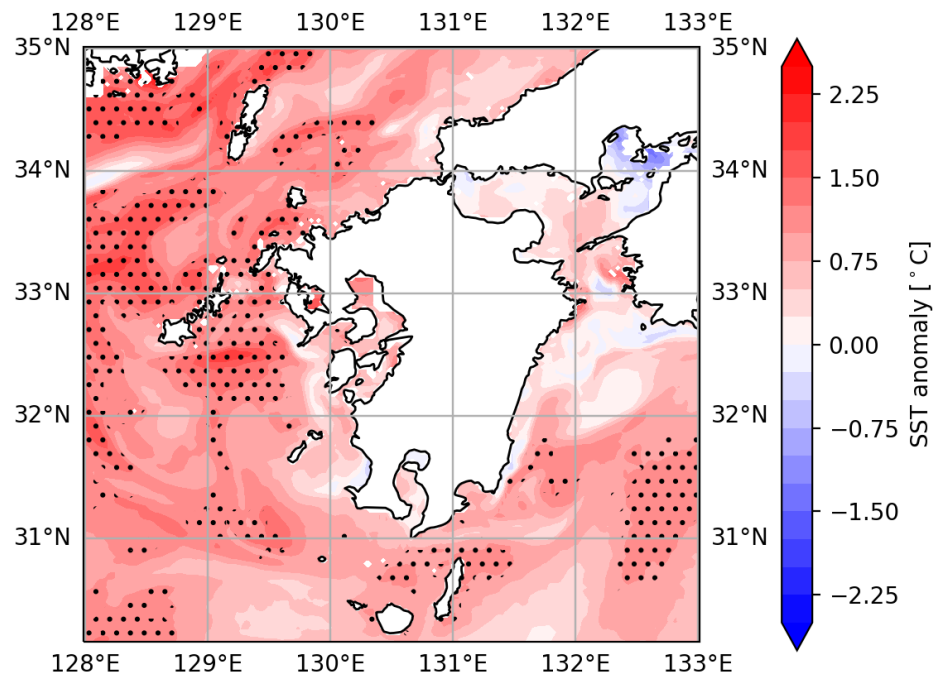


(a) 発生初期

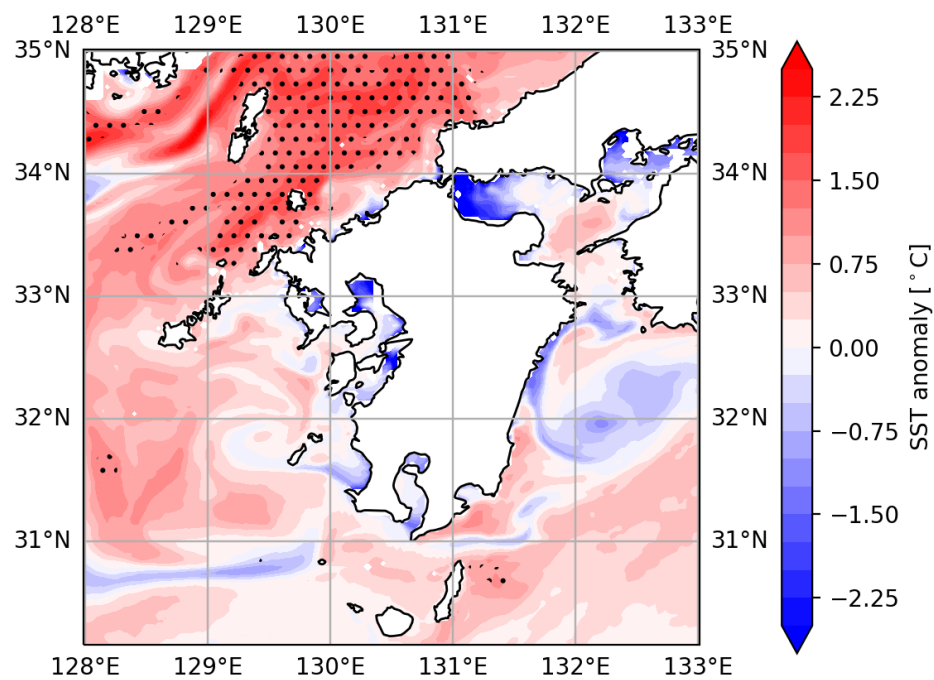


(b) 終息初期

図 4.12 2022 年 7 月に発生した海洋熱波の(a)発生初期(2022/06/30)、(b)終息時期(2022/07/12)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。



(a) 発生初期



(b) 終息時期

図 4.13 2021 年 10 月に発生した海洋熱波の(a)発生初期(2021/10/04)、(b)終息時期(2021/10/28)における海面水温の水温偏差。黒のドットは海洋熱波が発生している箇所を示す。

第5章 まとめ

本研究では、再解析モデル JCOPE-T DA の日平均海面水温を用いて、九州周辺の海域における近年の海洋熱波の発生傾向を明らかにすることを目的とした。衛星観測 MODIS による海面水温と MGD SST を用いて気候値と閾値を算出し、2019～2023 年の間に発生した海洋熱波の 1 年あたり平均発生回数と平均発生日数を求めた。また九州北部の海域に注目し、季節ごとに異なる海洋熱波の特徴を検証した。

海洋熱波の発生傾向は、九州が面する海域（太平洋・東シナ海・日本海）によって特徴が異なることが明らかになった。対馬暖流が流れる九州北部の海域では、九州から韓国沿岸にかけて広い範囲で発生しており回数・日数どちらも多かった。黒潮が流れる九州南部の海域では、東西で顕著な違い見られた。南東沖では、発生回数が多いものの、発生日数が少ないことから、持続時間の短い海洋熱波である。一方、南西部では、発生回数と発生日数ともに少なく、海洋熱波があまり発生していない海域となっている。さらに海洋熱波の判定に用いる閾値の算出方法を変えて検証した結果、対馬海峡の周辺は用いる閾値に関わらず海洋熱波の発生が活発な海域であることが明らかになった。

九州北部の海域で発生する海洋熱波に注目し、季節による持続時間や強度の違いを検証したところ、海洋熱波は、冬から春にかけて発生するものが最も長く、1 か月から最大 4 か月間持続した。一方、海洋熱波の強度は夏の海洋熱波が最も大きく、ピーク時には気候値を 3.0 度以上も上回った。この特徴は海中水温の偏差の傾向とも一致した。冬から春にかけて発生する海洋熱波と秋に発生する海洋熱波の分布は海流の影響も受けており、水温偏差が海中まで広がっていた。しかし夏に発生する海洋熱波は、海面に集中しており、大気による加熱効果で発生したことが推測される。本研究では九州周辺の海域で発生する海洋熱波の特徴を水温偏差の時系列と空間分布から調査したが、より詳細な発生メカニズムを解明するには、海面混合層の熱収支解析を行うことが求められる。

参考文献

Dzwonkowski, B., Coogan, J., Fournier, S., Lockridge, G., Park, K., and Lee, T. (2020) Compounding impact of severe weather events fuels marine heatwave in the coastal ocean. *Nat. Commun.* 11:4623.

Feng, M., McPhaden, M. J., Xie, S. and Hafner, J. (2013) La Niña forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011. *Scientific Reports* 3:1277.

Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonne, P., Cigliano, M., et al. (2009) Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology* 15:1090–1103.

林田 博士, 宮澤 泰正, 美山 透, 馬場 雄也, 木戸 晶一郎 (2024) 海中天気予報. *Oceanography in Japan* 33:89-101

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C.J., et al. (2016) A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* 141:227–238.

Hosoda, K., Murakami, H., Sakaida, F., and Kawamura, H. (2007) Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific. *Journal of Oceanography* 63:267-280

Hughes, T. P., Kerry, J. T., A-Noriega, M., A-Romero, J.G., Anrerson, K. D., Baird, A. H., et al. (2017) Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543: 373–377.

Jacox, M. G., Alexander, M. A., Amaya, D., Becker, E., Bograd, S. J., Brodie, S., et al. (2022) Global seasonal forecasts of marine heatwaves. *Nature* 604:486-490

気象庁 “貧酸素化” (2024a)

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deoxy/deoxygenation.html

(参照日 2025-1-24)

気象庁 “日本沿岸の海面水位上昇のやさしい解説” (2024b)

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/knowledge/sl_trend/sl_study.html(参照日 2025-1-24)

気象庁 “Daily Sea Surface Temperatures” (2024c)

ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/pub/JMA-product/mgd_sst_glb_D/Readme_mgd_sst_glb_D

(参照 2024-7-16)

- Kurihara, Y., Murakami, H., and Kachi, M. (2016) Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. *Geophys Res Let* 43:1234-1240
- Kuroda, H., and Setou, T. (2021) Extensive marine heatwaves at the sea surface in the Northwestern Pacific Ocean in summer 2021. *Remote Sens.* 13:3989.
- Mills, K. E., Pershing, A. J., Brown, C. J., Chen, Y., Chiang, F., Holland, D. S., et al. (2013) Fisheries management in a changing climate lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic. *Oceanography* 26:191-195.
- Miyama, T., Minobe, S. and Goto, H. (2021) Marine heatwave of sea surface temperature of the Oyashio region in summer in 2010–2016. *Front. Mar. Sci.* 7:576240.
- Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, K., et al. (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme. *Ocean Dynamics* 67:713-728.
- Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Kurihara, Y., Murakami, H., and Kachi, M. (2021) A Nowcast/Forecast System for Japan's Coasts Using Daily Assimilation of Remote Sensing and In Situ Data. *remote sensing* 13:2431
- Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., et al. (2018) Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat. Commun.* 9:1324.
- Perry, A. L., Low, P. J., Ellis, J. R. and Reynolds, J. D. (2005) Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308:1912–1915.
- Sorte, C. J. B., Fuller, A. and Bracken, M. E. S. (2010) Impacts of a simulated heat wave on composition of a marine community. *Oikos* 119:1909-1918.

謝辞

九州大学応用力学研究所の木田新一郎准教授には、本論文の研究課題の選定と遂行、さらに本論文の執筆にあたり、終始多大なるご指導、ご鞭撻を受け賜りました。心より感謝申し上げます。同研究所の磯辺篤彦教授、上原克人助教授には、ゼミを通して貴重な助言を数多くいただきました。深く感謝申し上げます。同研究室の技術職員の皆様ならびに秘書の皆様には研究活動のみならず日常生活においても多大なるご支援をいただきました。深く感謝申し上げます。研究室の同期学生をはじめとするメンバーには、常に多くの刺激を受けるとともに、研究以外の時間も充実したものとなり、心より感謝の意を表します。最後に、私に勉学の機会を与え、健康面や金銭面において支えてくれた家族に対し、深く感謝の意を表します。

本研究は、JAMSTEC の宮澤泰正上席研究員から提供いただいたデータに基づいて実施されました。貴重な JCOPE-T DA のデータをご提供いただき、心より感謝申し上げます。