

第8章 海水温

観測結果

- 世界の年平均海面水温は、工業化以前の水準に比べて上昇している（可能性が非常に高い）。また、日本近海の年平均海面水温は 100 年当たり 1.33℃ の割合で、有意に上昇している。

将来予測

- 日本近海の 21 世紀末の年平均海面水温は 20 世紀末に比べ有意に上昇し（確信度が高い）、4℃ 上昇シナリオ（RCP8.5）で $3.45 \pm 1.30^\circ\text{C}$ 、2℃ 上昇シナリオ（RCP2.6）で $1.13 \pm 0.65^\circ\text{C}$ 上昇すると予測されている。

8.1 世界

8.1.1 観測結果

(1) 海面水温

IPCC 第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書（IPCC, 2021; 9.2）によると、2011～2020 年の世界平均の海面水温は、1850～1900 年（工業化以前）の水準と比べて 0.88℃（可能性の幅は 0.68～1.01℃）上昇した 可能性が非常に高い。また、気象庁が米国海洋大気庁（NOAA）作成の ICOADS（International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set）や現業的に収集している近年のデータを合わせた 100 年以上にわたる歴史的なデータに基づいて作成した海面水温格子点データ（COBE-SST2: Hirahara et al., 2014）に基づく解析でも世界の海面水温は上昇しており（信頼水準 99% で統計的に有意）、1891 年から 2024 年の世界平均の海面水温の上昇率は 100 年当たり +0.62℃ である（図 8.1.1）。2024 年の世界全体の年平均海面水温の平年差（1991～2020 年の平均値からの差）は、COBE-SST2 に基づく解析では +0.44℃ で、1891 年以降では最も高い値となり、この結果 2015 年から 2024 年までの最近 10 年間の値が上位 10 番目までを占めることとなった（図 8.1.1）。

また、海面水温の長期変化傾向には海域ごとに違いがあり、1950 年から 2014 年にかけては、インド洋、西部太平洋赤道域及び西岸境界流域では世界平均より上昇率が高かった一方、南極海、東部太平洋赤道域及び北大西洋では世界平均より上昇率が低い、若干下降傾向であった（確信度が非常に高い（IPCC, 2021; 9.2））（図 8.1.2）。

世界全体の平均海面水温は、地球温暖化の指標として用いられる世界の平均気温（第 4.1 節参照）と同様、その長期的な上昇には地球温暖化の影響が考えられるが、気候システムに内在する数年から数十年規模の自然変動の影響も受けている。

年々変動に関しては、エルニーニョ現象に追従して低緯度域を中心に海面水温が上昇し（Trenberth et al., 2002）、全球平均の海面水温も上昇することが知られている。例えば、全球平均海面水温平年差が +0.44℃ となり過去 134 年間で最も高かった 2024 年は、春にエルニーニョ現象が終息した年であり、+0.40℃ で 2 番目に高かった 2023 年は春に発生したエルニーニョ現象が冬にかけて発達した年であった。ただし、個々のエルニーニョ現象の規模と平均海面水温の上昇幅との関係は単純に対応するものではなく、またエルニーニョ現象以外の自然変動の影響も及んでいる可能性がある。

数年以上の時間規模の変動（図 8.1.1 の青線）に注目すると、最近では 1970 年代半ばから 2000 年前後にかけて明瞭な上昇傾向を示した後、2010 年代初めにかけては横ばい傾向で推移し（ハイエイタス。第 4.1.1 項の (1) 参照）、その後再び上昇傾向を示した。これは地球温暖化に伴う百年規模の

変化に十年から数十年規模の自然変動が重なっているためと考えられており、地球温暖化の進行を正確に評価するためには、この自然変動の影響の評価が欠かせない。また、近未来の地球温暖化予測を行う上でも、海洋の自然変動の影響を加味することが課題となっている（コラム 2 参照）。

こうした海面水温の上昇が進むにしたがい、海洋生態系に深刻かつ持続的な影響をもたらさうる海面付近の持続的な異常高温現象である「海洋熱波」が、20 世紀にわたってより頻繁に発生するようになってきている（確信度が高い（IPCC, 2021; Box 9.2））（コラム 11 参照）。

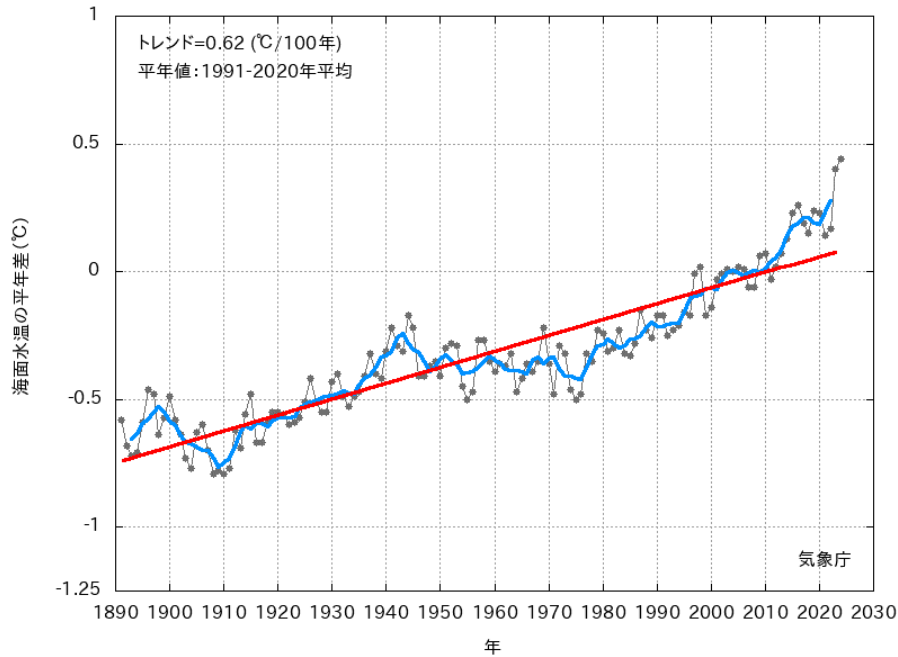


図 8.1.1 世界全体の年平均海面水温年平均差の年々変動（1891～2024 年）
各年の値を黒丸、5 年移動平均値を青い実線、長期変化傾向を赤い実線で示す。

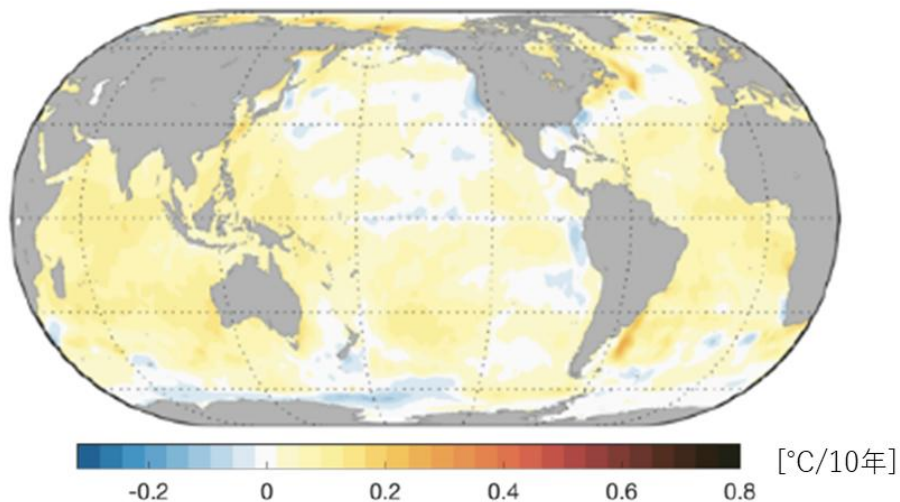


図 8.1.2 観測された海面水温の 1950～2014 年における長期変化傾向（トレンド）
単位は 10 年当たり°C。（IPCC, 2021; Figure 9.3 の一部を改変・和訳・転載。）

(2) 海洋貯熱量

地球表面の7割を占める海洋は、大気に比べて熱容量が大きいと大量の熱を蓄えることができ、温室効果ガスの増加により地球に新たに加わった熱エネルギーの約 91%を取り込んでいる (IPCC, 2021;7.2)。したがって、海洋に蓄えられる熱量 (貯熱量) の変化は、地球温暖化の進行を監視する上で重要な指標である。また、海水温の上昇に伴う海水の熱膨張は水位に影響を及ぼすため、水位変化の要因について定量的な評価を行う上でも、貯熱量の増加を把握することが必要である。貯熱量の増加による水温上昇は、海洋生物が生息する環境の変化を通じた生態系への影響の観点からも懸念されている。

図 8.1.3 は、過去の現場観測データを基に作成した『歴史的海水温データセット』(Ishii et al., 2017) に基づく、海面から深度 2,000 m までの海洋貯熱量の 1955 年からの増加量である。貯熱量は長期的に増加する傾向にあり、2024 年の貯熱量は 1955 年と比べて約 49×10^{22} J 増加した。貯熱量の増加は 1990 年代半ばから加速しており、例えば 1993 年の前後で比べると、1993 年以前は 10 年当たり約 3.9×10^{22} J であったところ、同年以降は 10 年当たり約 10.2×10^{22} J と、約 2.6 倍となっている。このような加速は IPCC (2021) でも注目されている {2.3}。また、海洋表層 (ここでは海面から深度 700 m まで) と中層 (ここでは深度 700 m から 2,000 m まで。なお、海洋の平均水深は約 4,000 m である。) で比較すると、それぞれの貯熱量の増加量は約 32×10^{22} J、約 17×10^{22} J と、地球温暖化の影響が海面付近のみならず海洋内部まで及んでいることが分かる。海洋内部に熱が蓄えられる仕組みとしては、海面から熱が海の中へ直接伝わっていくことがまず挙げられる。これに加え、中・高緯度の海面付近の海水が低緯度側のより軽い海水の下に沈み込んでいく流れや、北大西洋や南極大陸近くの海域で生成される低温で高塩分の重い海水が深層に達する対流、またこれらの循環によっても、熱が運ばれていると考えられている (IPCC, 2013;3.2)。海洋貯熱量の変化は水平方向に一樣ではなく、10 年程度の時間スケールでは海流などの変化に起因する熱エネルギーの再分配により海域によっては寒冷化する場所もある (Zika et al., 2021)。ただし、十分長い期間で見れば、地球温暖化に伴う熱エネルギーの増加の影響が顕在化するため、統計的に有意な寒冷化傾向を示す海域が減少して統計的に有意な昇温傾向を示す海域が増加し (Johnson and Lyman, 2020)、中・高緯度での沈み込みや深層に達する対流などの海洋循環を反映した分布パターンとなる (IPCC, 2021;9.2)。

世界平均の地上気温や海面水温は、1990 年代末から 2010 年前後まで昇温が滞った (ハイエイトス。第 4.1.1 項の (1) 及び図 4.1.2 参照) が、海洋貯熱量にはそのような滞りは認められず、この期間も変わらず上昇は続いている。新たに加わった熱エネルギーの 90%以上が海洋に取り込まれていることを考えると、地球システム全体のエネルギーはこの期間も増加傾向に大きな変化はなかったと判断される。つまり、地球システム内で、気温や海面水温の滞りに対応する分、大気から海洋や雪氷圏などへ熱エネルギーが移動したと考えられる。

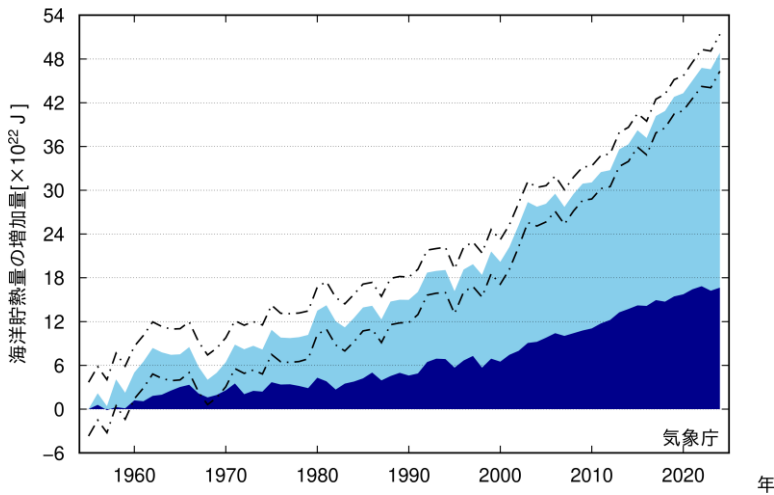


図 8.1.3 1955 年以降の年平均海洋貯熱量の増加

水色の陰影は海面から深度 700 m ま
で、紺色の陰影は深度 700 m から
2,000 m までの年平均貯熱量の 1955
年からの増加量。一点鎖線は海面から
深度 2,000 m までの解析値の 95%信
頼区間を示す。

8.1.2 将来予測

IPCC (2021) によると、海面水温は排出シナリオに応じた速度で、**ほぼ確実に** 21 世紀中に上昇し続けると見られる（確信度が高い）{8.2}。世界の平均海面水温は、21 世紀末（2081～2100 年平均）には、現在（1995～2014 年平均）と比べて、2°C 上昇シナリオ（SSP1-2.6）では 0.86°C、4°C 上昇シナリオ（SSP5-8.5）では 2.89°C 上昇すると予測される（IPCC, 2021; 9.2; 図 8.1.4(a)）。現在（1995～2014 年平均）から 21 世紀末（2081～2100 年平均）までに海面から深度 2,000 m まで（上層 2,000 m 深まで）の海洋が吸収する熱量は、2°C 上昇シナリオ（SSP1-2.6）で 1.06×10^{24} J（66%信頼区間：0.80～1.31 $\times 10^{24}$ J）、4°C 上昇シナリオ（SSP5-8.5）で 1.89×10^{24} J（66%信頼区間：1.60～2.29 $\times 10^{24}$ J）であると予測される（IPCC, 2021; 9.2; 図 8.1.4 (b)）。

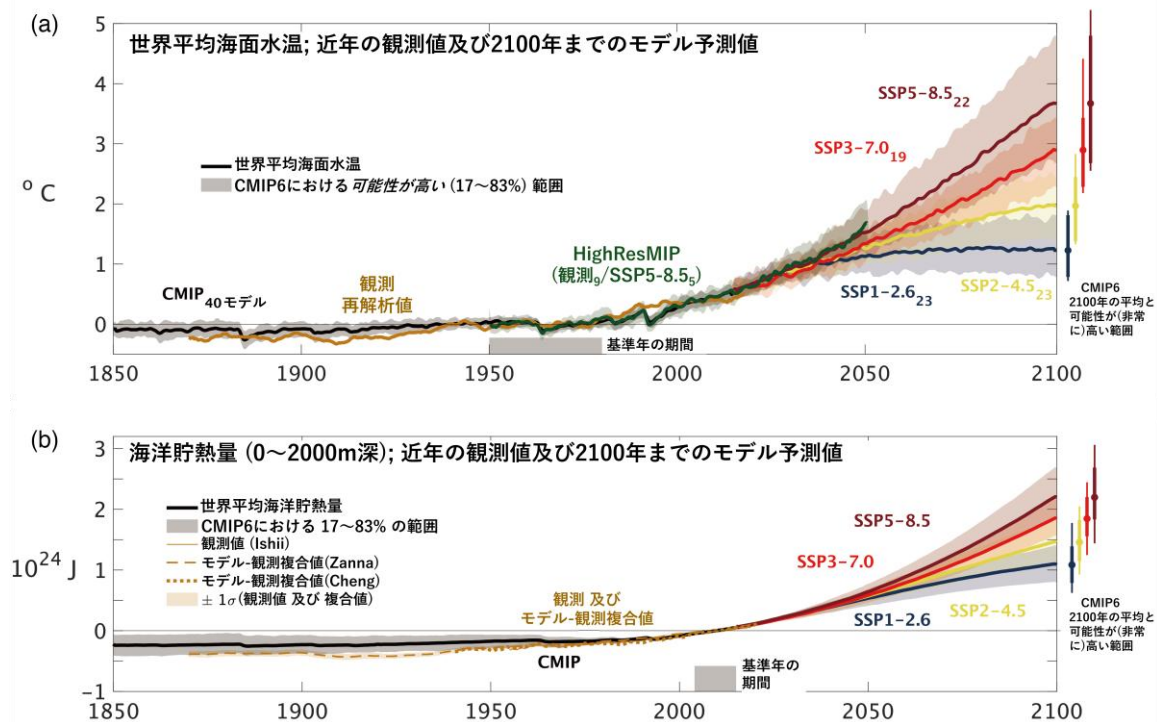


図 8.1.4 世界平均海面水温と上層 2,000 m 深までの海洋貯熱量の推移

(a) 世界の平均海面水温の 1950～1980 年平均値に対する偏差。(b) 上層 2,000 m 深までが持つ熱量の 2005～2014 年平均値に対する偏差。（IPCC, 2021; Figure 9.3 及び Figure 9.6 の一部を描画ツール (doi: 10.5281/zenodo.5217365)によって再現・和訳・転載。）

8.2 日本

8.2.1 観測結果

高槻ほか（2007）に倣い、気象庁が収集している船舶やブイ等の現場観測データ及びそれを基とする緯度・経度 1 度間隔の海面水温格子点データ（COBE-SST2: Hirahara et al., 2014）を組み合わせることで、海面水温の変動特性に基づき分類した日本近海の 13 海域及び日本近海全体における年平均海面水温の長期変化傾向を見積もった。なお、1900 年代初頭以前や第二次世界大戦中及びその後数年（1940～1950 年頃）は観測数が少なく、一定数に満たない年は欠測としている。網走沖は 1960 年代以前のデータが少ないため長期変化傾向の解析を行っておらず、13 海域にも含めていない。

図 8.2.1 に、日本近海の 13 海域で平均した年平均海面水温の長期変化傾向を示す。1900 年から 2024 年までの統計期間において 13 海域で平均した上昇率は、 $+1.33^{\circ}\text{C}/100$ 年となっており（信頼水準 99% で統計的に有意）、世界全体や北太平洋全体で平均した海面水温の上昇率（それぞれ $+0.62^{\circ}\text{C}/100$ 年、 $+0.65^{\circ}\text{C}/100$ 年）よりも高く、日本の気温の上昇率（ $+1.40^{\circ}\text{C}/100$ 年）と同程度の値となっている。

海域別に見ると（図 8.2.2）、各海域の上昇率は一様ではなく、日本海北東部、三陸沖、関東の東、関東の南、沖縄の東及び先島諸島周辺の海域平均海面水温の上昇率は日本の気温の上昇率よりも低く、日本海中部及び釧路沖では日本の気温の上昇率よりも高くなっている。季節別では、多くの海域で秋季・冬季の上昇率が高い。

上昇の割合は時間的にも一定ではなく、長期的な昇温に加えて十年規模の変動が顕著に認められる。全海域平均海面水温（年平均）（図 8.2.1）は、近年では 2000 年頃に極大、2010 年頃に極小となった後、上昇している。この海面水温の変化に対応する最も卓越する変動は、東シナ海北部、黄海、日本海南西部、日本海中部を中心に広い海域で冬季の海面水温に認められるもので、冬季の季節風の強さが深く関係していると考えられる。それ以外にも、北海道周辺海域を中心に 2000 年頃から夏季の海面水温の上昇が認められ、熱帯の対流活動の影響を受けていることや、日本海の冬季の海面水温については海洋内部の変動が影響していることが、可能性として指摘されている（吉田ほか, 2020; Park et al., 2012; 山田・佐藤, 2024）。また、より短周期の変動である年々変動も認められ、統計期間において全海域平均海面水温（年平均）が歴代 1 位となった 2024 年は、日本付近が暖かい空気に覆われやすかったことに加え、三陸沖周辺では、2023 年春から黒潮続流の北上が継続し、海面水温が高い状態が続いたことが、記録的な高海面水温に寄与した。

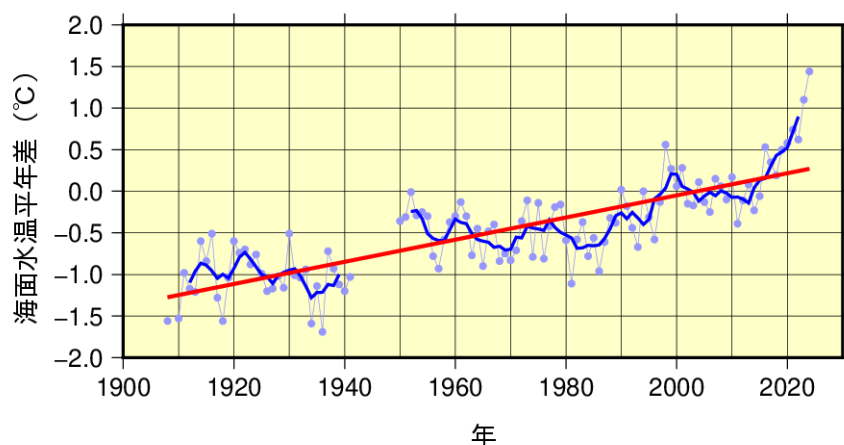


図 8.2.1 日本近海の全海域平均海面水温（年平均）の平年差の推移

図の青丸は各年の平年差を、青の太い実線は 5 年移動平均値を、赤の太線は長期変化傾向を表す。平年値は 1991～2020 年の 30 年間の平均値。1900 年代初頭以前や第二次世界大戦中及びその後数年(1940～1950 年頃)は観測数が少なく、一定数に満たない年は欠測としている。

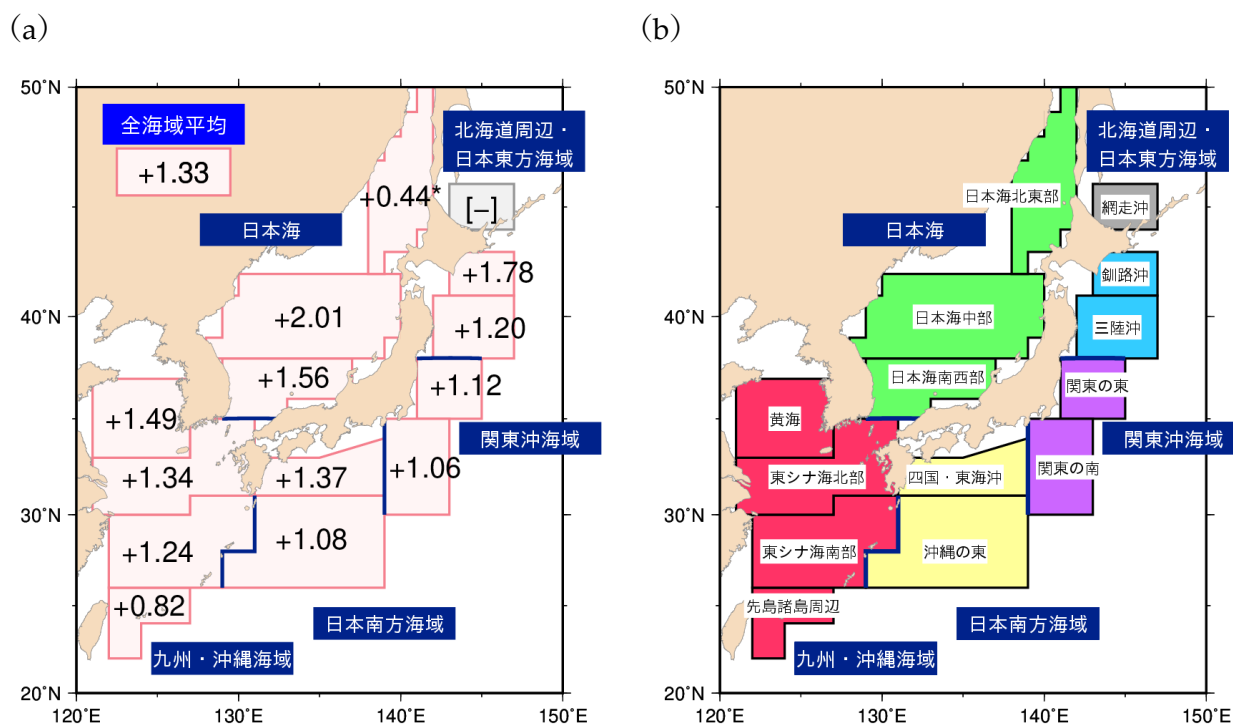


図 8.2.2 (a) 日本近海の海域平均海面水温（年平均）の上昇率（ $^{\circ}\text{C}/100$ 年）と (b) 海域区分

1900～2024 年までの上昇率（100 年当りの上昇幅）を示す。上昇率の数字は信頼水準 99%以上で有意な変化傾向があることを、「*」を付したものは信頼水準 95%以上で有意な変化傾向があることを示す。網走沖は 1960 年代以前のデータ数が少ないため長期変化傾向の解析は行っておらず、上昇率を[-]としている。

8.2.2 将来予測

『気候予測データセット 2022』に含まれる日本域海洋予測データ（コラム4参照）によると、日本近海の平均海面水温は、21世紀中に有意に上昇すると予測される（確信度が高い）。これは、観測での長期変化傾向や結合モデル相互比較プロジェクト第6期（CMIP6）モデル予測とも整合的な結果である。21世紀末（2081～2100年平均）には、20世紀末（1986～2005年平均）と比べて、2℃上昇シナリオ（RCP2.6）では1.13℃（90%信頼区間：0.48～1.78℃）、4℃上昇シナリオ（RCP8.5）では3.45℃（90%信頼区間：2.15～4.75℃）上昇すると推定される。これらの見積もりは世界平均より大きい値となっている。日本近海の海面水温上昇は一様でなく、上昇の程度は、2℃上昇シナリオ（RCP2.6）では黄海、4℃上昇シナリオ（RCP8.5）では釧路沖や三陸沖で大きいと予測される。

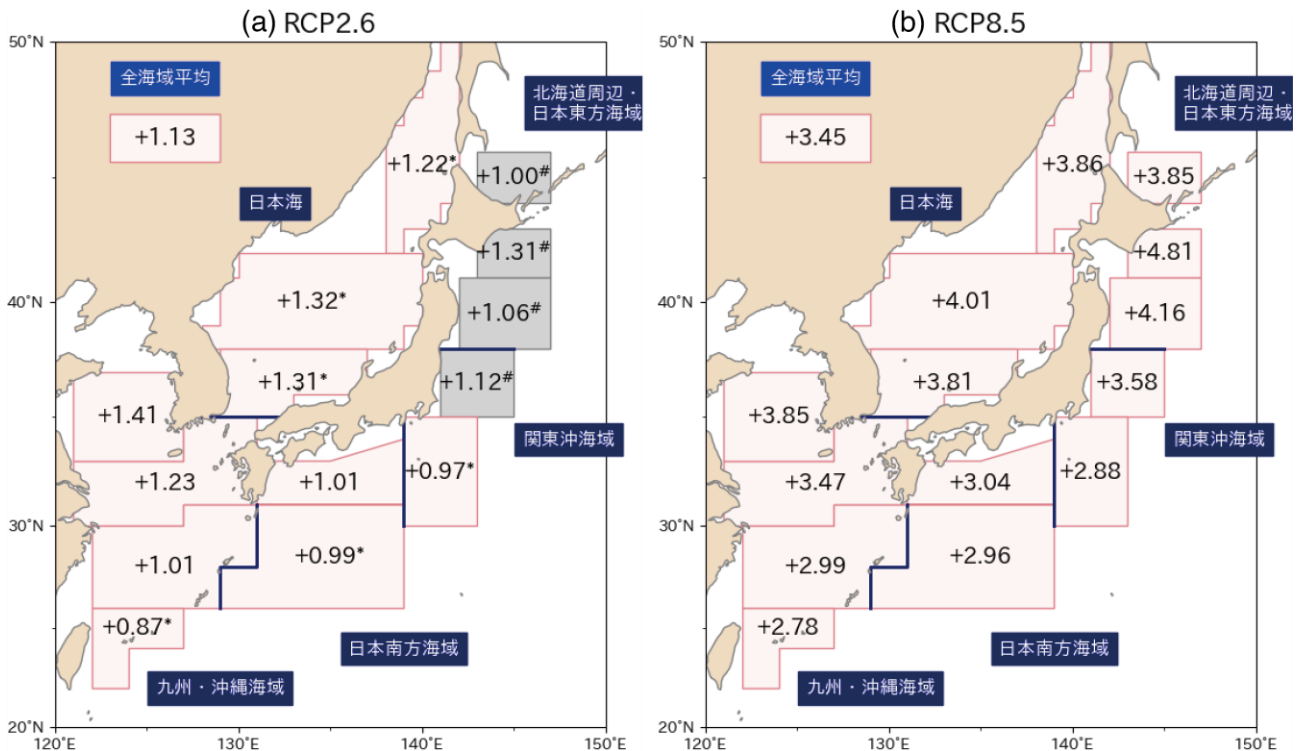


図 8.2.3 日本域海洋予測データに基づく、

21 世紀末における日本近海の海域平均海面水温の 20 世紀末からの上昇幅（℃）

(a) は 2℃ 上昇シナリオ（RCP2.6）、(b) は 4℃ 上昇シナリオ（RCP8.5）による見積もり。図中の無印の値は信頼水準 99% 以上で統計的に有意な値を、「*」を付した値は 95% 以上で有意な値を、「#」を付した値は統計的に有意な長期変化傾向が見出せないことを示している。

8.3 背景要因

1970 年代以降の海面から深度 2,000 m までの温暖化には、人為起源の強制力が主として駆動した可能性が極めて高い（IPCC, 2021; 9.2）。このような海洋内部の昇温は、海水の熱膨張を通じて世界平均海面水位の上昇をもたらす要因の一つとなっている（第 9.3 節参照）。また、海水温の上昇率は表層の方が大きいため、表層と深層の密度差が拡大し海洋内部の成層の度合いが強まりつつあり、生態系への影響が懸念されている（IPCC, 2021; ES 9.1; 第 14.1.2 項参照）。

一般に、日本を含む西岸境界流域では、1900 年から現在までの海面水温上昇率が全球平均よりも 2 倍から 3 倍高いという見積もりがある（Wu et al., 2012）。海洋再解析データ（simple ocean data assimilation (SODA): Giese and Ray, 2011）に基づく解析によると、その主要因として、風系の北上

に伴い 1900 年以後、西岸境界流が強まった、あるいは 1 度程度北上した傾向が寄与した可能性が指摘されている (Wu et al., 2012)。しかし、西岸境界流続流の位置の変化や力学的変化については見解の一致度が低い (IPCC, 2021; 9.2)。

日本付近の海面水温上昇率が世界平均の上昇率よりも高い要因としては、上記の海洋循環の変化 (日本付近においては暖流である黒潮の変化) の影響に加え、大陸に近い海域の海面水温の上昇率が相対的に高くなっていることから、日本に近い大陸内陸部での高い気温の上昇率の影響を受けている可能性も考えられる (第 4.1.2 項の (1) 参照)。また、大気海洋結合モデルを用いた最近の研究によると、1980 年代以降の亜熱帯循環⁹¹域の昇温の要因として、対流圏下層において北西太平洋域に運ばれた暖気の移流と亜熱帯循環の北偏を伴う海洋循環の変化の双方が寄与した可能性が指摘されている (Toda and Watanabe, 2020)。

日本域海洋予測データによる 4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) 下の将来予測では、日本近海の水温は世界平均より上昇幅が大きい。なかでも三陸沖や釧路沖で特に海面水温の上昇幅が大きい (図 8.2.3 (b))。これらの海域は、モデルの現在気候における海面水温の南北傾度が大きい領域 (海洋前線域) に対応している (図 付録 A.3.1 (a))。今回用いたモデルでは、偏西風の北偏に伴い北太平洋の亜熱帯循環が北偏する傾向が見られた (確信度は中程度、第 14.2.2 項の (1) 参照) ことから、その結果として、特に海洋前線域で大きな水温差が生じたと考えられる。

91 各大洋の貿易風と偏西風に挟まれた海域の表層に海上風によって引き起こされる流れで、北太平洋では時計回りの循環になる。