

第3章 沖縄周辺の海域における海洋の経年変化

海洋と大気は密接に関係しており、地球環境や気候の変動を考える上でも海洋は極めて重要な存在である。気象庁はこれまで、海洋気象観測船等により長期にわたる海洋の観測、解析を続けており、地球環境に関連した海洋の状態とその見通しについては、「海洋の健康診断表」として気象庁ホームページで提供している

(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index.html>)。

本章では沖縄周辺の海域における海面水温と海面水位の経年変化について記述する。

3.1 海面水温の経年変化

○ 沖縄周辺の海域の年平均海面水温は、長期的には100年あたり0.86~1.22°Cの割合で上昇している。

ここでは、海面水温の長期変動パターンの類似度を基にして、沖縄周辺の海域を「東シナ海南部」、「先島諸島周辺」、「沖縄の東」（図3.1.1）に分類し、それぞれの海域の経年変化について記述する（高槻ほか, 2007）。

(1) 年平均海面水温

各海域の海面水温の100年あたりの上昇率（統計期間は1901~2021年（東シナ海南部、先島諸島周辺）、1911~2021年（沖縄の東））（図3.1.1）は東シナ海南部で+1.22°C/100年、沖縄の東で+0.86°C/100年、先島諸島周辺で+0.87°C/100年であり、各海域とも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+0.56°C/100年、+0.55°C/100年）（付録A.1.3参照）より大きくなっている。東シナ海南部では日本の気温の上昇率と同程度だが、沖縄の東と先島諸島周辺では日本の気温よりも小さな上昇率となっている。およそ100年間にわたる日本全国の年平均気温の上昇率は、+1.28°C/100年（統計期間：1898~2021年）（付録A.1.1参照）である。

1900年から2021年までの各海域における年平均海面水温平年差の経年変化を図3.1.2に示す。なお、図3.1.2では、1年間の各月の月平均平年差（全12個）のうち、5個以上算出できれば年平均を算出する。

沖縄周辺の海域の海面水温は1998年が最も高く、沖縄地方の年平均気温も同様である。沖縄地方の年平均気温（図2.1.1）と東シナ海南部の年平均海面水温を比べると、1998年、2016年、2017年、2021年の高い年や2011年の低い年が同様の傾向を示している。

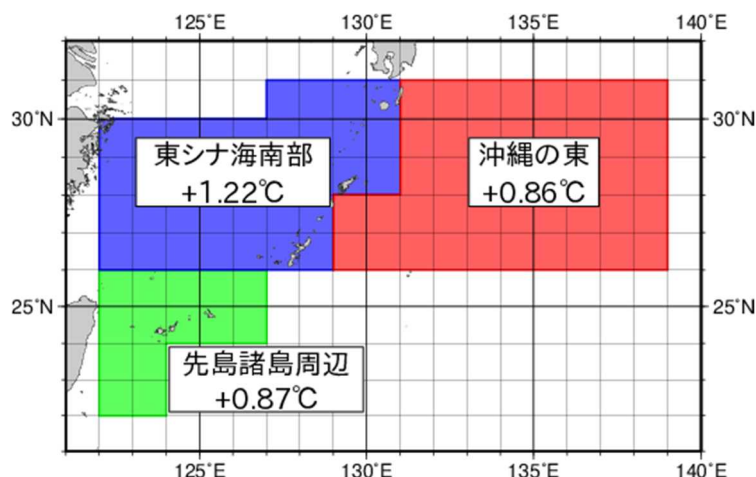


図 3.1.1 沖縄周辺の海域における海域区分と 100 年あたりの海面水温上昇率
統計期間は 1901～2021 年（東シナ海南部、先島諸島周辺）、1911～2021 年（沖縄の東）。

(2) 季節別の平均海面水温

表 3.1.1 に、沖縄周辺の海域における各季節の 100 年あたりの海面水温上昇率を、図 3.1.3～図 3.1.6 に、1900 年から 2021 年までの各海域における季節別の平均海面水温平年差の経年変化を示す。なお、これらの海域では、海面水温が 1 月から 3 月にかけて最低になり、7 月から 9 月にかけて最高になることから、季節分けを春（4～6 月）、夏（7～9 月）、秋（10～12 月）、冬（1～3 月）とした。また、月平均海面水温平年差が季節の中で 2 か月以上ある場合のみ、それらの平年差を平均して各季節の平均海面水温平年差とした。

100 年あたりの海面水温上昇率（以下「上昇率」という。）を海域別にみると、東シナ海南部では秋季と冬季の上昇率が大きくなっており、先島諸島周辺と沖縄の東では秋季の上昇率が最も大きくなっている。なお、沖縄周辺の海域においては、沖縄の東の春季を除いた全ての海域及び季節で海面水温が上昇している。

海域間の違いを季節別にみると、春季と冬季において海域間の差が大きく、いずれも東シナ海南部の上昇率が大きい。一方、夏季と秋季の上昇率は、海域間の差が小さい（表 3.1.1）。このことから、年平均海面水温の上昇率の差は春季と冬季の上昇率の差によるものと考えられる。

表 3.1.1 沖縄周辺の海域における各季節の 100 年あたりの海面水温上昇率

春は 4～6 月、夏は 7～9 月、秋は 10～12 月、冬は 1～3 月。海域ごとに上昇率が最高の季節をピンク色で、また、上昇率が年平均より大きい季節を薄ピンク色で示している。統計期間は、年平均は図 3.1.1 に、各季節はそれぞれ図 3.1.3～3.1.6 に同じ。『*』を付加してある上昇率は、有意水準 95%以上で有意であることを示す（無印は同 99%以上で有意）。

海域\季節	年平均	春	夏	秋	冬
東シナ海南部	+1.22	+1.27	+0.72	+1.35	+1.53
先島諸島周辺	+0.87	+0.70	+0.79	+1.23	+0.92
沖縄の東	+0.86	+0.53*	+0.99	+1.07	+0.92

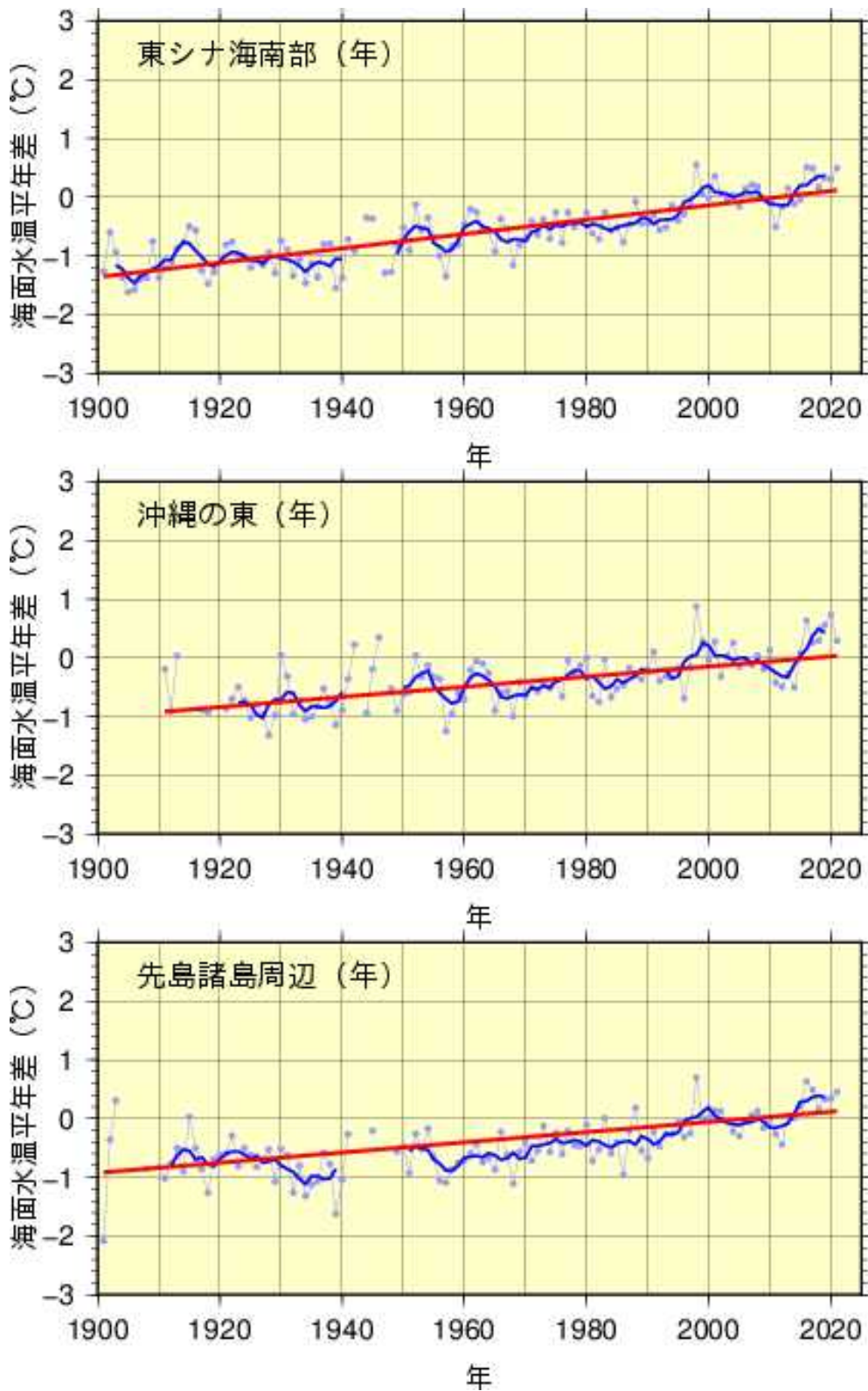


図 3.1.2 沖縄周辺の海域における海域別の年平均海面水温平年差の経年変化

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、赤の太い実線は長期変化傾向を表す。平年値の期間は1991～2020年。統計期間は図3.1.1に同じ。

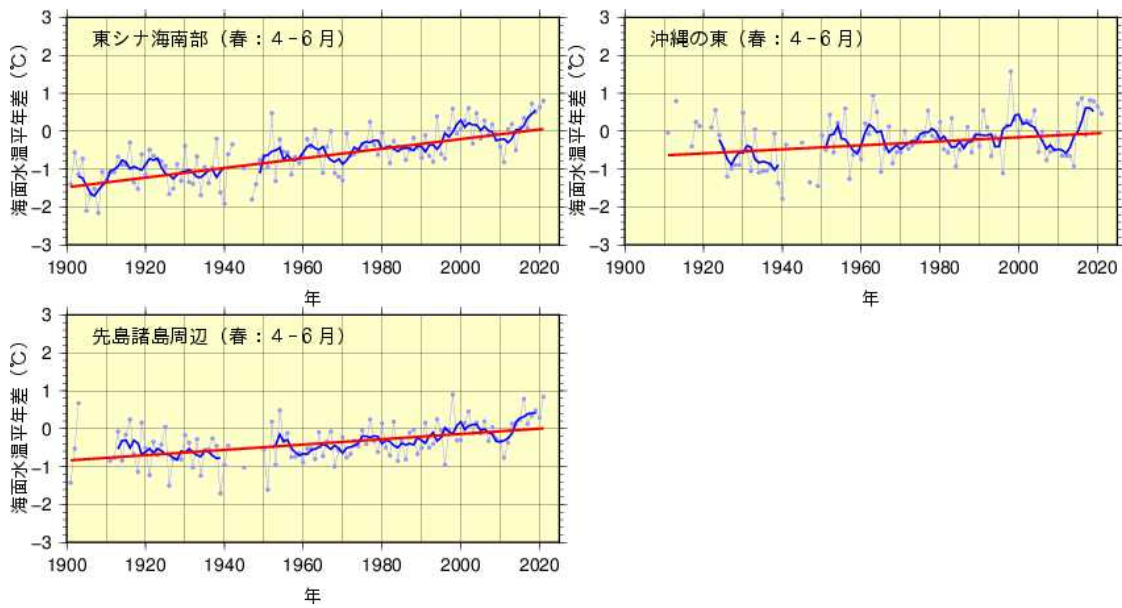


図 3. 1. 3 沖縄周辺の海域における海域別の春季平均海面水温の平年差の経年変化

統計期間は 1901～2021 年（東シナ海南部、先島諸島周辺）、1911～2021 年（沖縄の東）。

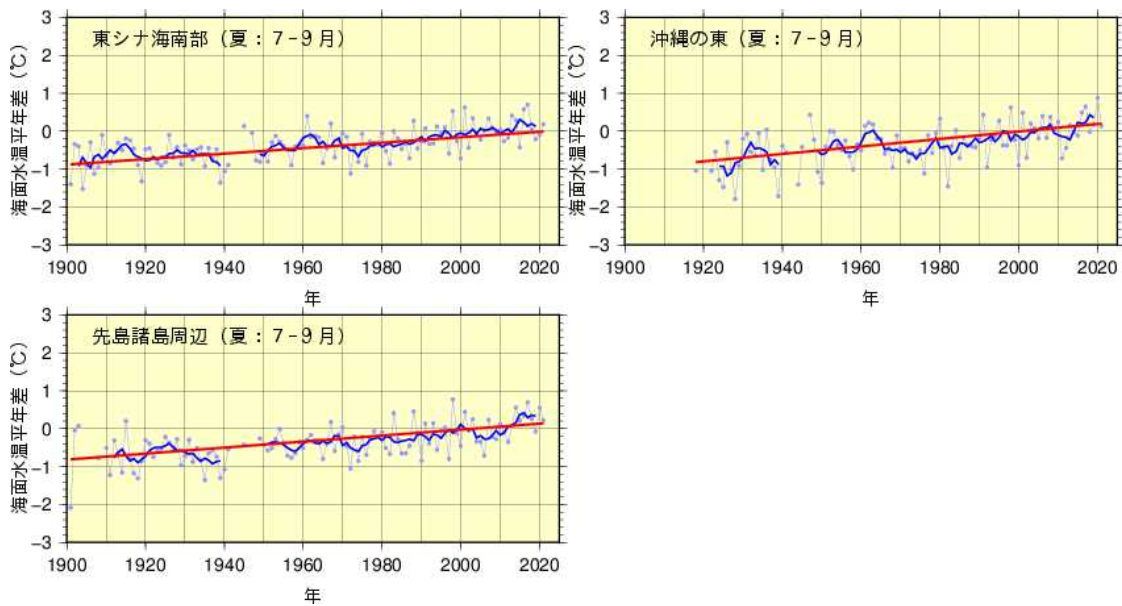


図 3. 1. 4 沖縄周辺の海域における海域別の夏季平均海面水温の平年差の経年変化

統計期間は 1901～2021 年（東シナ海南部、先島諸島周辺）、1918～2021 年（沖縄の東）。

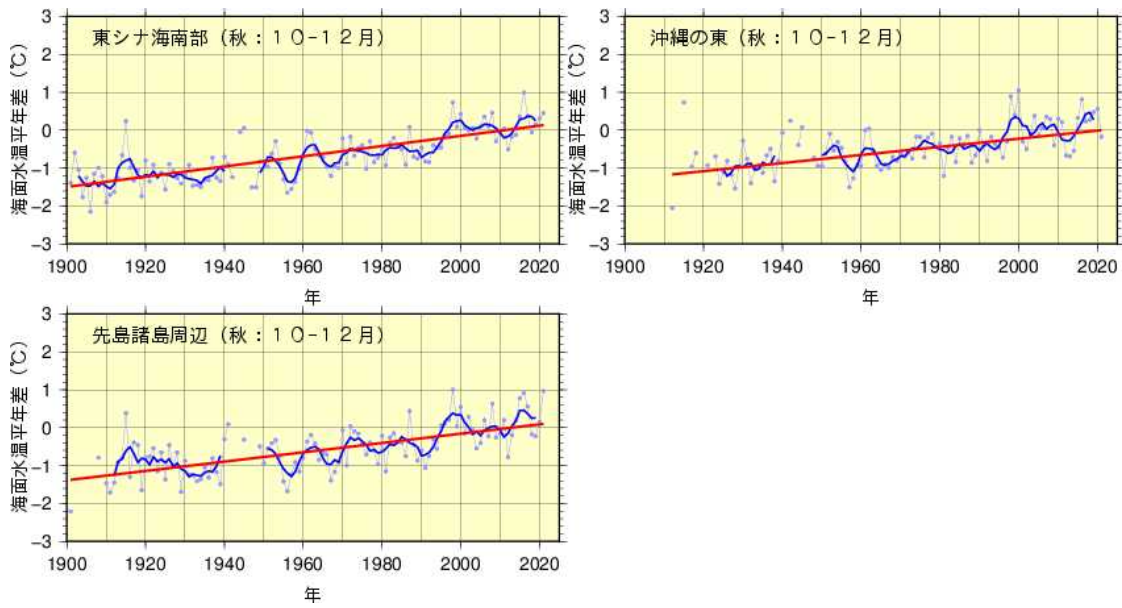


図 3.1.5 沖縄周辺の海域における海域別の秋季平均海面水温の平年差の経年変化

統計期間は 1901～2021 年（東シナ海南部、先島諸島周辺）、1912～2021 年（沖縄の東）。

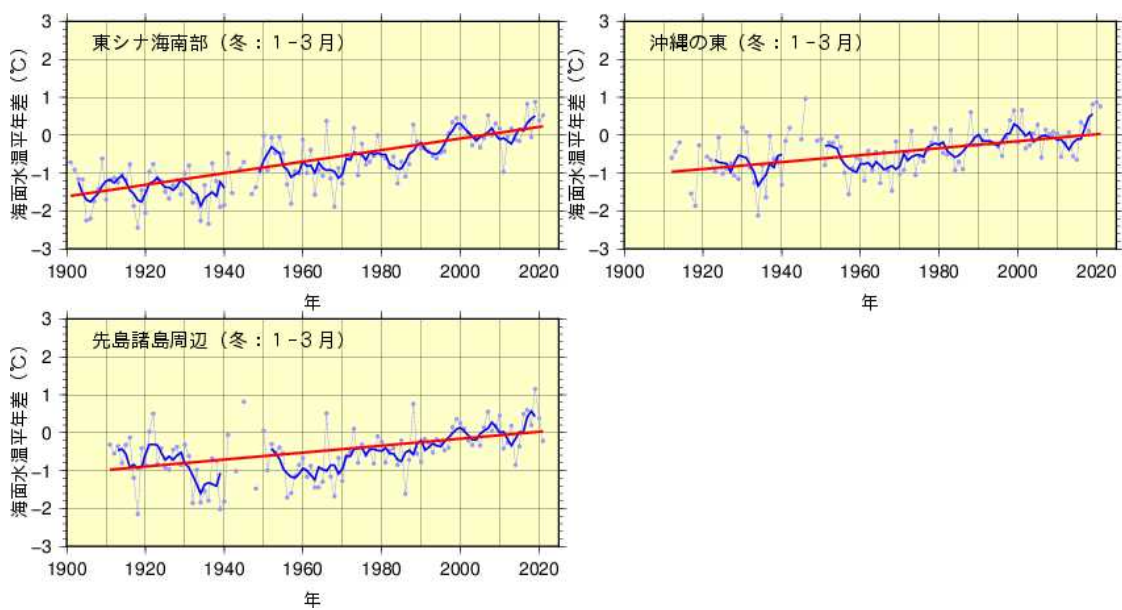


図 3.1.6 沖縄周辺の海域における海域別の冬季平均海面水温の平年差の経年変化

統計期間は 1901～2021 年（東シナ海南部）、1911～2021 年（先島諸島周辺）、1912～2021 年（沖縄の東）。

3.2 海面水位の経年変化

○ 沖縄地方における海面水位は、統計開始以降、1年あたり2.3~2.4mmの割合で上昇している。

気象庁所管の潮位観測地点（那覇及び石垣：図3.2.1）における各年の年平均潮位を用いて求めた、沖縄地方における海面水位の経年変化を図3.2.2に示す。統計開始（那覇：1967年、石垣：1969年）以降、海面水位は、那覇は1年あたり2.3mm、石垣は1年あたり2.4mmの割合で上昇しており、明瞭な上昇傾向が現れている。

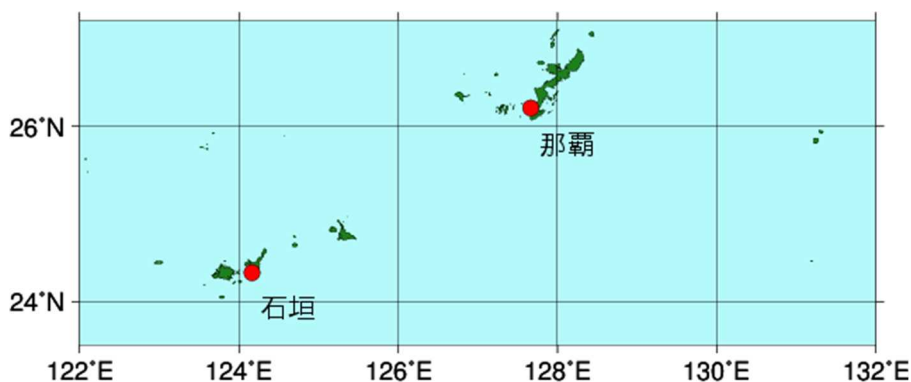


図3.2.1 海面水位の経年変化を求めた潮位観測地点（●）

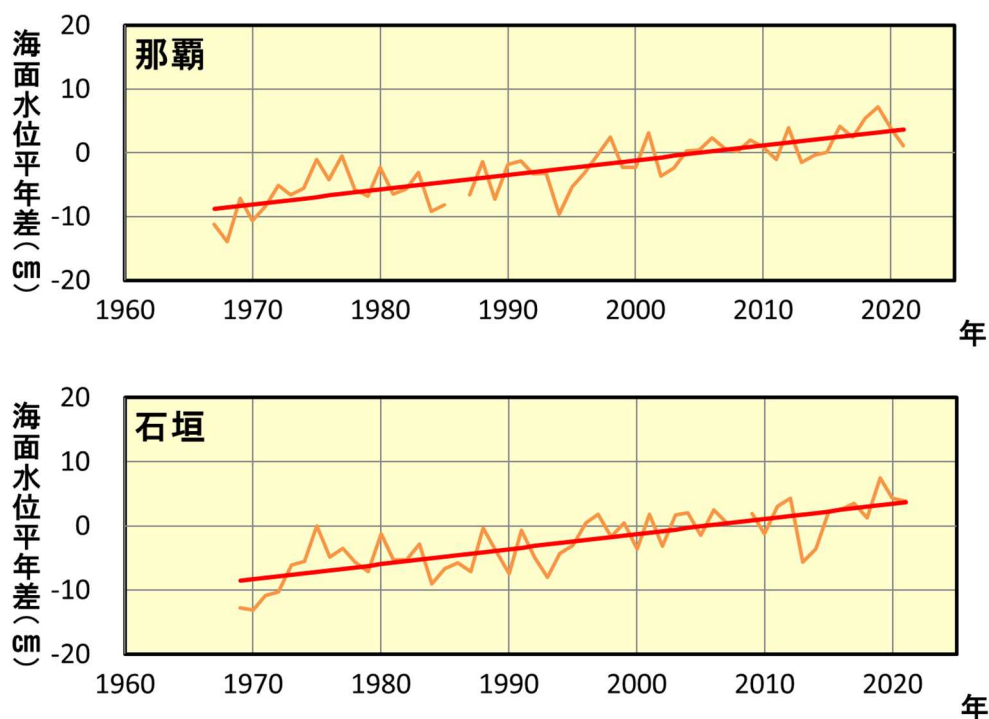


図3.2.2 那覇（上）と石垣（下）における海面水位平年差の経年変化

海面水位平年差は年平均潮位から平年値を引いたもの（単位 cm）。平年値の期間は1991～2020年。赤の実線は海面水位の長期変化傾向を表す。なお、地盤変動は考慮していない。

海面水位変動の要因

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「第6次評価報告書第1作業部会報告書」(以下「AR6」)(IPCC, 2021)は、「世界平均海面水位は、1901～2018年の間に0.20 [0.15～0.25] m 上昇した」(A.1.7)とし、さらに「1900年以降、少なくとも過去3千年間のどの百年よりも急速に上昇している(確信度が高い)」(A.2.4)と評価している。また上昇率の変化について、「1901～1971年の間は1.3 [0.6～2.1] mm/年だったが、1971～2006年の間は1.9 [0.8～2.9] mm/年に増大加し、2006～2018年の間には3.7 [3.2～4.2] mm/年に更に増加した(確信度が高い)。少なくとも1971年以降に観測された世界平均海面水位の上昇の主要な駆動要因は、人間の影響であった可能性が非常に高い」(A.1.7)と評価し、近年になるほど上昇率が大きくなっていると述べている。

AR6はその原因について、「気候システムの蓄熱は、陸域の氷の減少と海洋の温暖化による熱膨張により、世界平均海面水位の上昇をもたらした。1971～2018年に観測された海面水位上昇の50%が海洋の熱膨張で説明される一方、22%は氷河からの氷の減少、20%は氷床からの氷の消失、8%は陸域における貯水量の変化が寄与した」(A.4.3)としている。すなわち、海水温の上昇に伴う海水の熱膨張と氷床および氷河の減少が主要な原因だとしている。報告書は続けて「2010～2019年の氷床の質量減少速度は、1992～1999年の4倍であった。氷床と氷河の質量減少が合わさって、2006～2018年の世界平均海面水位の上昇の支配的な要因となった(確信度が高い)」(A.4.3)としていて、近年の海面水位上昇の要因への寄与が、熱膨張よりも氷床や氷河の融解の方が大きくなったことを示している(表C.7参照)。

AR6は将来の海面水位の変化について、「世界平均海面水位が21世紀の間、上昇し続けることは、ほぼ確実である」(B.5.3)とし、「長期的には、海洋深部の温暖化と氷床の融解が続くため、海面水位は数百年から数千年にわたり上昇することが約束されており、数千年にわたり上昇したままとなる(確信度が高い)」(B.5.4)としており、温室効果ガスの排出削減が進んだ場合でも海面水位の上昇が続くと指摘している。

更にAR6では、可能性が高い範囲だけでなく、温室効果ガスの高排出シナリオ下において、「可能性が低くとも(もし発生した場合の)影響が大きいため排除できない氷床のプロセス含む」予測に言及しており、1900年を基準として、2100年には1.5mを超え、2300年には15mを超える海面水位上昇の可能性も排除できないとしている。ここに言う「氷床のプロセス」とは、具体的には南極氷床の大規模な融解を指している。

表 C.7 海面水位上昇率の要因別寄与と観測値
IPCC AR6 (IPCC, 2021) を基に作成。

世界平均海面水位の上昇速度 (mm/年) と要因ごとの寄与		
要因	1971-2018年	2006-2018年
熱膨張	1.01 [0.73～1.29]	1.39 [0.74～2.05]
氷河*	0.44 [0.21～0.67]	0.62 [0.57～0.68]
グリーンランド氷床	0.25 [0.16～0.34]	0.63 [0.51～0.74]
南極氷床	0.14 [-0.09～0.37]	0.37 [0.24～0.50]
陸水貯留量	0.15 [-0.05～0.36]	0.60 [0.32～0.88]
寄与の合計	2.00 [1.52～2.49]	3.61 [2.88～4.35]
観測値	2.33 [1.55～3.12]	3.69 [3.21～4.17]

*グリーンランドと南極を除く
※本文、表中の角括弧は95%の信頼区間を示す。

海洋の酸性化

18世紀後半のイギリスから始まる世界的な工業化以降、大気中の二酸化炭素は人為起源の排出によって増加している。それに伴って海洋にも多くの二酸化炭素が溶け込んでおり、その量は人為起源の二酸化炭素の約30%を占める。大気中の二酸化炭素の増加は温暖化を引き起こす一方、海洋中に溶けた二酸化炭素は酸として振る舞う。そのため、一般的に弱アルカリ性を示す海水は、二酸化炭素が溶けることによってアルカリ性の性質を弱められ、酸性側に近づく（酸性にはならない）。この変化を「海洋の酸性化」と呼ぶ。

気象庁では海洋気象観測船による海洋観測結果から、北西太平洋海域の表面海水において海洋の酸性化が進行していることを明らかにした (Ishii *et al.*, 2011)。また、当庁の海洋気象観測船の観測データに加え、国際的な海洋観測データも取り入れた解析によって、海洋内部でも酸性化が進行していることを明らかにした (Takatani *et al.*, 2014)。これらの解析をもとに気象庁ホームページ「海洋の健康診断表」⁷を通じて、海洋の酸性化に関する定期的な監視情報を提供している。また、大西洋や南大洋でも同様に酸性化傾向にあると報告されており、海洋の酸性化は世界的に進行している。

現在も大気中の二酸化炭素は増え続けており、今後も海洋の酸性化が進行すると考えられる。酸性化が進行すると、海水の化学的な性質が変化し、海洋が二酸化炭素を吸収しにくくなり、大気中に残留する二酸化炭素が増加することによる温暖化の加速が懸念される。またサンゴなどの海洋生物が殻や骨格を形成することを妨げ、海洋生態系に影響すると指摘されている。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「第6次評価報告書第1作業部会報告書」(IPCC, 2021)は、将来の海洋の変化について、「複数の証拠に基づけば、(中略)、海洋酸性化(ほぼ確実)、(中略)は、将来の(温室効果ガスの)排出に応じた速度で、21世紀の間、進行し続けるだろう」(B.5.1)とし、「海洋深層の酸性化(確信度が非常に高い)(中略)は、数百年から数千年の時間スケールで不可逆的である」(B.5.1)と評価している。

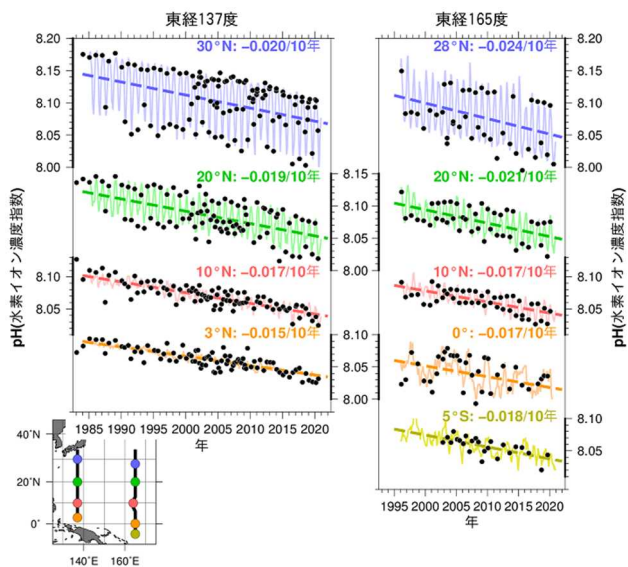


図 C.8 北西太平洋における海洋酸性化

東経137度線、東経165度線の各緯度における表面海水の水素イオン濃度指数(pH)の長期変化気象庁ホームページ「海洋の健康診断表」の図を編集。

⁷ 「海洋の健康診断表」表面海水中のpHの湯嚙気変化傾向(北西太平洋)

(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html)。



「日本の気候変動 2020」（文部科学省、気象庁）

2020年12月、文部科学省と気象庁は気候変動適応法に基づく国の責務として、気候変動に関する最新の科学的知見を総合的に取りまとめ、国や地方公共団体、事業者、国民が気候変動緩和・適応策や気候変動影響評価の基盤情報として活用できるよう「日本の気候変動 2020 -大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書-」⁸を公表した（図 C.3.1）。



図 C.3.1 日本の気候変動 2020（本編）表紙

パリ協定の「2℃目標」が達成された場合（RCP2.6 シナリオ：以下「2℃上昇シナリオ」）と、追加的な緩和策を取らなかった場合（RCP8.5 シナリオ：以下「4℃上昇シナリオ」）のそれぞれについて、あり得る将来予測を対比させてとりまとめている点が大きな特徴である。様々な利用者に対して必要な情報を提供するため、日本の気候変動に関する最新の観測事実と将来予測を概観した「本編」と、より詳細な情報を専門家向けに記述した「詳細版」を提供している。

気候変動の観測に関する記述は、気象庁の観測点や観測船による観測データ、世界各国で観測され世界気象機関（WMO）の枠組みで交換・共有された観測データ、衛星観測データ（主に海氷）、及び再解析データ等を用いて作成した海洋の格子点データを解析した結果に基づいている。

気候変動の将来予測は、「IPCC 第5次評価報告書」における2℃上昇及び4℃上昇シナリオに基づく文部科学省及び気象庁の予測結果を中心に、不確実性や確信度を付して記述している。

一例として、21世紀末における日本付近の気温（図 C.3.2）及び海面水温の将来予測（図 C.3.3）を掲載する。

気象庁は、これまで「地球温暖化予測情報 第9巻」（2017）において、4℃上昇シナリオに基づく将来予測を公表していたが、今回文部科学省の成果も含め、2℃上昇シナリオに基づく将来予測を対比させて示したことで、各方面の緩和策・適応策の計画・実行に際し、本報告書が基盤的な情報として、より幅広く参照されるよう取り組んでいく。

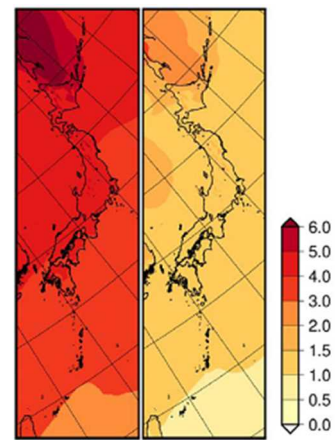


図 C.3.2 21世紀末（2076～2095年平均）における日本の年平均気温の変化の分布（℃）（本編 図 3.1）左：4℃上昇シナリオ、右：2℃上昇シナリオでの予測。20世紀末（1980～1999年平均）との差。

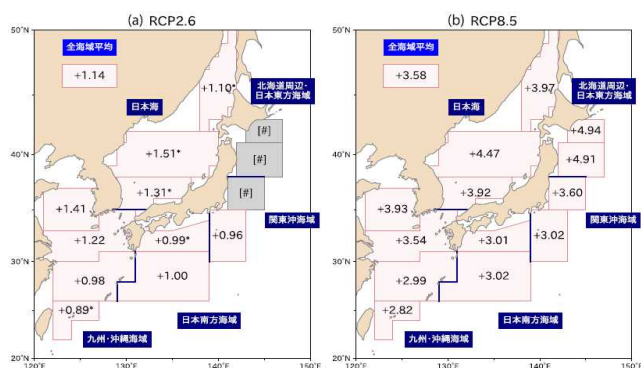


図 C.3.3 21世紀末の日本近海の海域平均海面水温の20世紀末からの上昇量（℃）（本編 図 13.1）2℃上昇シナリオ（左）及び4℃上昇シナリオ（右）に基づく見積もり。図中の [#] は、統計的に有意な変化傾向が見出せない海域を示す。



⁸<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>（気象庁ホームページ）