

2.12 海洋の二酸化炭素と海洋酸性化⁵⁸

- 二酸化炭素の濃度は、洋上大気、表面海水ともに長期的に増加している。
- 海洋は人為起源の二酸化炭素を吸収しており、吸収された二酸化炭素は海洋中へ蓄積している。
- 人為起源二酸化炭素の吸収・蓄積に伴い、海洋の pH は低下傾向にある。

海洋は人間活動によって排出された二酸化炭素の大きな吸収源であり、海洋が二酸化炭素を吸収し内部に蓄積することで、大気中の二酸化炭素増加を緩和している。一方、その反面、海水の化学的性質に変化が生じている。特に、“海洋酸性化”として知られている海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の低下は、海洋による大気中の二酸化炭素の吸収能力を低下させて地球温暖化を加速させたり、プランクトンの成長を阻害して海洋の生態系に影響を与えたりするなど、懸念すべき問題となっている。IPCC 第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書（IPCC, 2021）によると、人間活動で排出された大気中の二酸化炭素を海洋が吸収することにより、全球平均の海洋表面 pH は、今世紀末には 19 世紀終盤に比べ 0.16～0.44 低下すると予測している。また、海洋表層で吸収された二酸化炭素が、海洋の循環や生物活動により海洋内部に運ばれ蓄積することによる、海洋内部での酸性化も指摘されている（Doney et al., 2009）。

2.12.1 海洋の二酸化炭素

（1）北西太平洋における二酸化炭素の吸収と蓄積

気象庁の海洋気象観測船によって観測された、北西太平洋（東経 137 度線上の北緯 3 ～ 34 度及び東経 165 度線上の南緯 5 ～ 北緯 35 度）の表面海水中及び大気中の二酸化炭素分圧は、全ての海域において増加し続けている（図 2.12-1、図 2.12-2）。東経 137 度線では、1985 年から 2021 年までの 37 年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は 1.5 ～ 2.1 μ atm/年（平均 1.8 μ atm/年）の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は 1.8 ～ 2.0 μ atm/年（平均 1.8 μ atm/年）の割合で増加している。東経 165 度線では、1996 年から 2021 年までの 26 年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は 1.8 ～ 2.8 μ atm/年（平均 2.1 μ atm/年）の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は 1.8 ～ 2.1 μ atm/年（平均 2.0 μ atm/年）の割合で増加している。亜熱帯域においては、表面海水中の二酸化炭素分圧は、海面水温が高くなる夏季に高く、海面水温が低くなる冬季に低いという季節変動をしており、その変動幅は東経 137 度線、東経 165 度線ともに緯度が高いほど大きくなるという特徴がある。それに対して大気中の二酸化炭素分圧の季節変動は小さく、夏季以外には表面海水中の二酸化炭素分圧が大気中の二酸化炭素分圧を下回るため、一年を通じて平均すると海洋が大気中の二酸化炭素を吸収している。東経 137 度線と東経 165 度線の二酸化炭素分圧を比較すると、観測期間・観測範囲の違いによる差はみられるが、その増加傾向に大きな違いはない。ただし東経 165 度線における赤道周辺ではエルニーニョ・ラニーニャ現象の影響を受けて、表面海水中の二酸化炭素分圧は変動する。赤道域の日付変更線より東側の海域では、海洋の下層から二酸化炭素を多く含む海水が湧昇することによって二酸化炭素分圧の高い海水が広がっているが、エルニーニョ現象発生時には貿易風が弱まり湧昇域が東側に限られるため東経 165 度の二酸化炭素分圧は低く抑えられ、ラニーニャ現象発生時には貿易風が強まり湧昇域が西側まで広がり二酸化炭素分圧は高くなる。このため年ごとの表面海水中二酸化炭素分圧の変動が大きい。また、この湧昇による高い二酸化炭素分圧は大気中の二酸化炭素分圧を上回るため、165 度線の赤道域では海洋が大気中に二酸化炭素を放出している。

⁵⁸ 気象庁ホームページでは、海洋の二酸化炭素・海洋酸性化の監視成果を公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index_co2.html（海洋の温室効果ガスと海洋酸性化）

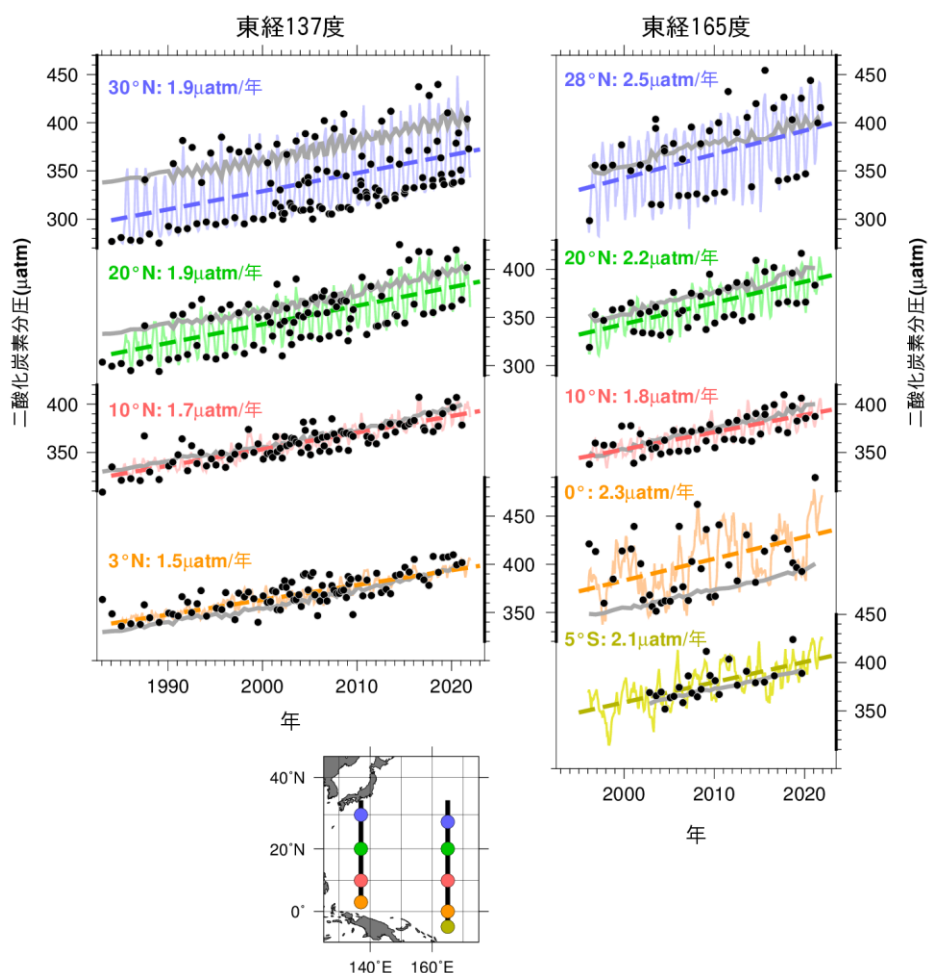


図 2.12-1 東経 137 度線（左図）及び東経 165 度線（右図）における表面海水中と大気中の二酸化炭素分圧の長期変化⁵⁹

図は、表面海水中の二酸化炭素分圧の観測値（●）及び解析によって得られた推定値（細線）と長期変化傾向（破線）並びに大気中の二酸化炭素分圧（灰色の実線）を示している。推定値は二酸化炭素濃度や全炭酸、アルカリ度などの観測データに基づいて海面水温や塩分などから推定する手法を用いた。

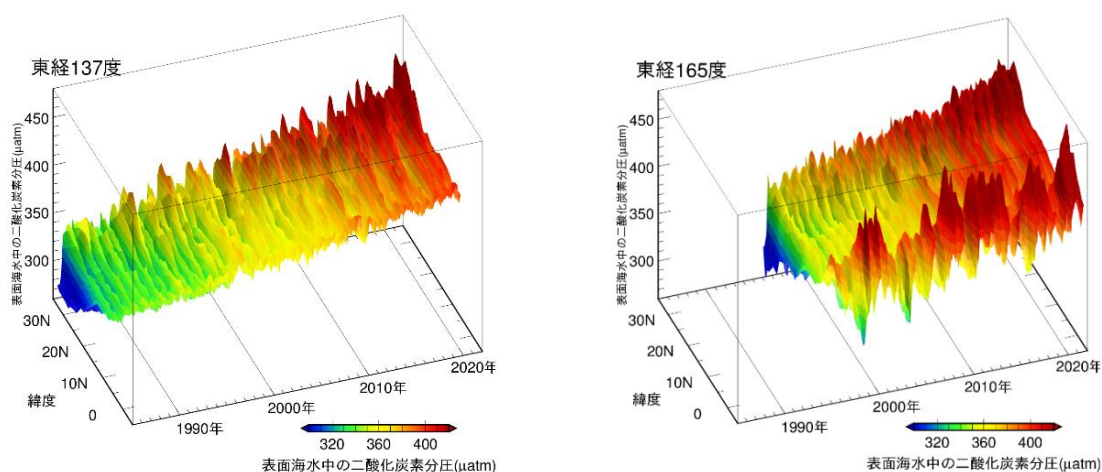


図 2.12-2 緯度ごとの表面海水中の二酸化炭素分圧の経年変化

図は東経 137 度線の北緯 3 度～北緯 34 度（左）、東経 165 度線の南緯 5 度～北緯 35 度（右）における緯度ごとの表面海水中の二酸化炭素分圧の経年変化を示している。

⁵⁹ 気象庁ホームページでは、海洋による二酸化炭素の吸収（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaivou/shindan/a_2/co2_trend/co2_trend.html

海洋に蓄積された二酸化炭素の量は、海洋内部の二酸化炭素量の増加傾向から見積もることができる。1990 年代以降の海洋内部の二酸化炭素の長期時系列観測データを利用して、東経 137 度に沿った北緯 10～30 度と東経 165 度に沿った北緯 10～35 度の海域に蓄積された二酸化炭素量を見積もった（図 2.12-3）。1990 年代以降、海面から深さ約 1000 m までの海洋中に蓄積した二酸化炭素量は、東経 137 度及び東経 165 度で 4～11 トン炭素/km²/年（単位面積 1 年あたりに蓄積した炭素の重量に換算）であった。特に北緯 20～30 度付近で二酸化炭素の蓄積量が多い。東経 137 度と東経 165 度のこれらの海域では、大量の二酸化炭素が溶け込んだ海水が北太平洋亜熱帯モード水や北太平洋中層水と呼ばれる水塊によって海洋内部に輸送され、より深くまで分布しているため、北緯 10 度や北緯 35 度に比べて二酸化炭素蓄積量が多くなっていると考えられる。

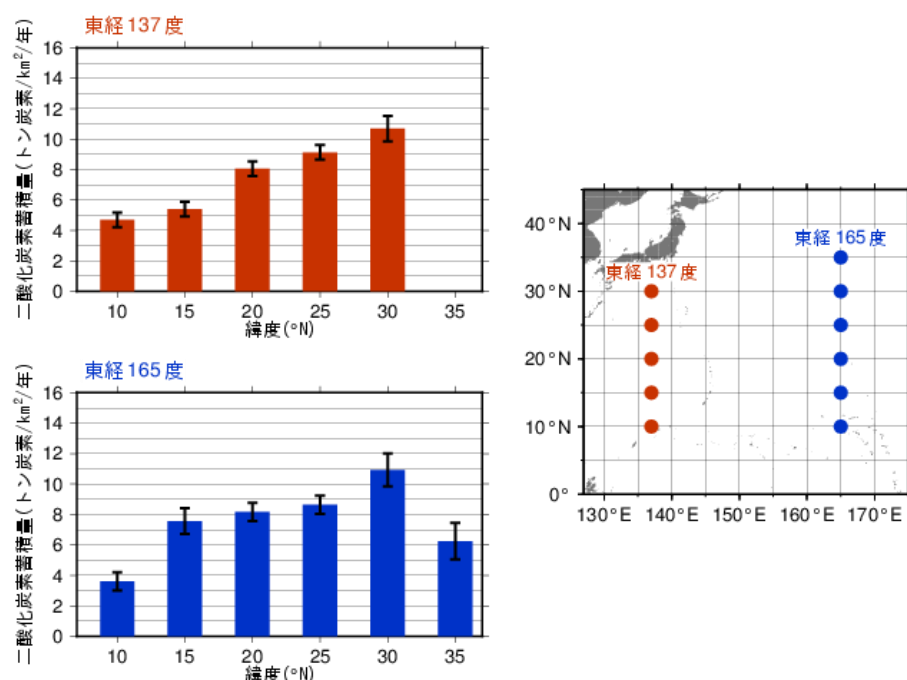


図 2.12-3 東経 137 度及び東経 165 度における緯度ごとの 1 年あたりの二酸化炭素蓄積量(左図)と解析対象とした海域(右図)⁶⁰
左図中のエラーバーは、信頼区間 95% の範囲を示す。解析期間は、東経 137 度が 1994 年～2021 年、東経 165 度が 1992 年～2021 年。

(2) 海洋全体の二酸化炭素の吸収

これまで蓄積された国内外の海洋観測データから、表面海水中の二酸化炭素濃度と水温・塩分・クロロフィル濃度との間には、海域や季節によってそれぞれ特徴の異なる相関関係があることがわかっている。この相関関係を利用して、水温と塩分の解析データや衛星によるクロロフィル濃度の観測データから、全海洋の表面海水中の二酸化炭素濃度を推定し、二酸化炭素の吸収・放出を解析した（図 2.12-4）。

図 2.12-4 左図は、二酸化炭素の吸収・放出の分布を示している。赤道付近やインド洋北部では、二酸化炭素を多く含む海水が下層から湧き上がり、表面海水中の二酸化炭素濃度が大気中よりも高い海域となっているため、海洋から大気中に二酸化炭素が放出（赤色域）されている。それ以外の広い海域では表面海水よりも大気中の二酸化炭素濃度が高くなっているため、海洋が大気から二酸化炭素を吸収（青色域）している。特に中緯度から高緯度にかけては、冬季における海面水温の低下や、春から秋にかけての生物活動による二酸化炭素の消費に伴い、表面海水中の二酸化炭素濃度が低下するため、二酸化炭素の吸収が大きくなっている。図 2.12-4 右図は、二酸化炭素吸収量の月ごと及び年間の積算値を示している。海洋全体では、1990～2020 年の平均で年間に 21 億トン炭素の二酸化炭素を吸収している。河川からの流入を含む自然の炭素循環による 6 億トン炭素 (IPCC,

⁶⁰ 気象庁ホームページでは、海洋中の二酸化炭素蓄積量に関する情報を公表している。
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_2/co2_inventory/inventory.html

2021) を考慮すると、海洋が蓄積する二酸化炭素の量は、化石燃料の燃焼や土地利用の変化といった人間の活動によって放出された二酸化炭素(2010年代において1年あたりおよそ94億トン炭素(IPCC, 2021))の約3割に相当する。また、海洋の二酸化炭素吸収量は増加傾向にある。

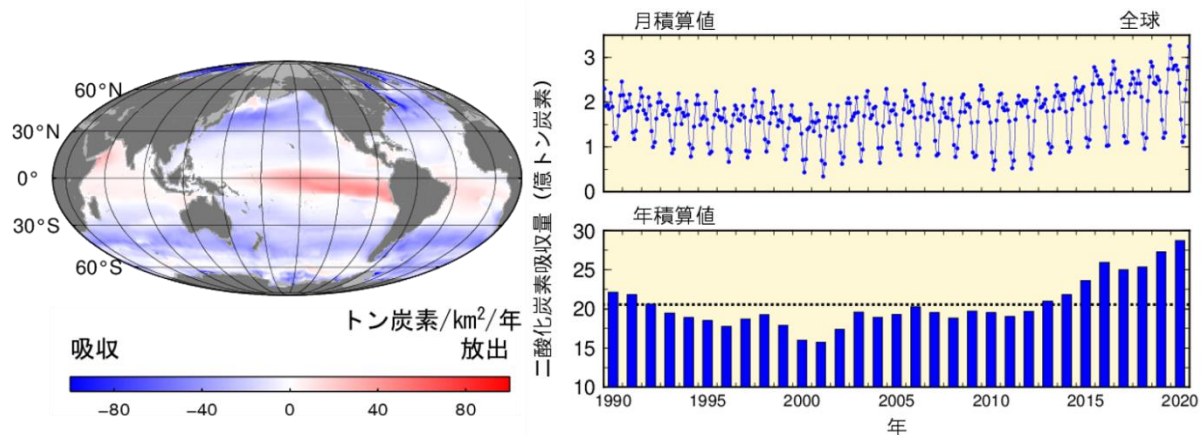


図 2.12-4 全海洋における二酸化炭素の吸収・放出の 2020 年の分布 (左図) 及び二酸化炭素吸収量の月ごと及び年間の積算値 (1990～2020 年) ⁶¹

左図は 2020 年の全海洋における二酸化炭素の吸収・放出の分布を表したもので、赤で着色した海域は海洋から大気へ二酸化炭素が放出されていることを、青で着色した海域は大気中の二酸化炭素が海洋に吸収されていることを、灰色の領域は解析対象範囲外であることを示す。右図は月積算値及び年積算値を示したもので、年積算値の図の点線は 1990～2020 年の平均 21 億トン炭素を表す。単位は、炭素の重量に換算した値を用い、分布図では 1 年あたり単位面積あたりの「トン炭素/km²/年」、積算値では「億トン炭素」を用いている。

2.12.2 海洋酸性化

(1) 日本近海における海洋酸性化

表面海水中の pH を、観測データに基づいて海面水温や塩分などから推定する手法を用いて、日本近海の表面海水中の pH の分布を求め、海域ごとの長期変化傾向を解析した (図 2.12-5)。日本近海全体としては、表面海水中の pH は、10 年あたり 0.020 の割合で低下しており、世界各地で観測された pH の低下 (10 年あたり概ね 0.02 前後：日本の気候変動 2020) と同程度の速度で海洋酸性化が進行している。海域ごとにみると、日本南方海域、関東沖で 0.021 と、日本近海の平均値に近い値となっている一方、日本海では 0.023 と大きく、北海道周辺・日本東方海域では 0.017、九州・沖縄海域では、0.016 と小さくなっている。一般に水温の低い高緯度ほど pH の低下の割合が大きくなることや、海域に特有の海洋循環の自然変動の影響などによる差があらわれていると考えられるが、海域間の差は不確かさの範囲内にあり、日本近海では、酸性化の進行に大きな違いはみられていない。

⁶¹ 気象庁ホームページでは、海洋による二酸化炭素吸収量について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaivou/shindan/a_2/co2_flux_glob/co2_flux_glob.html

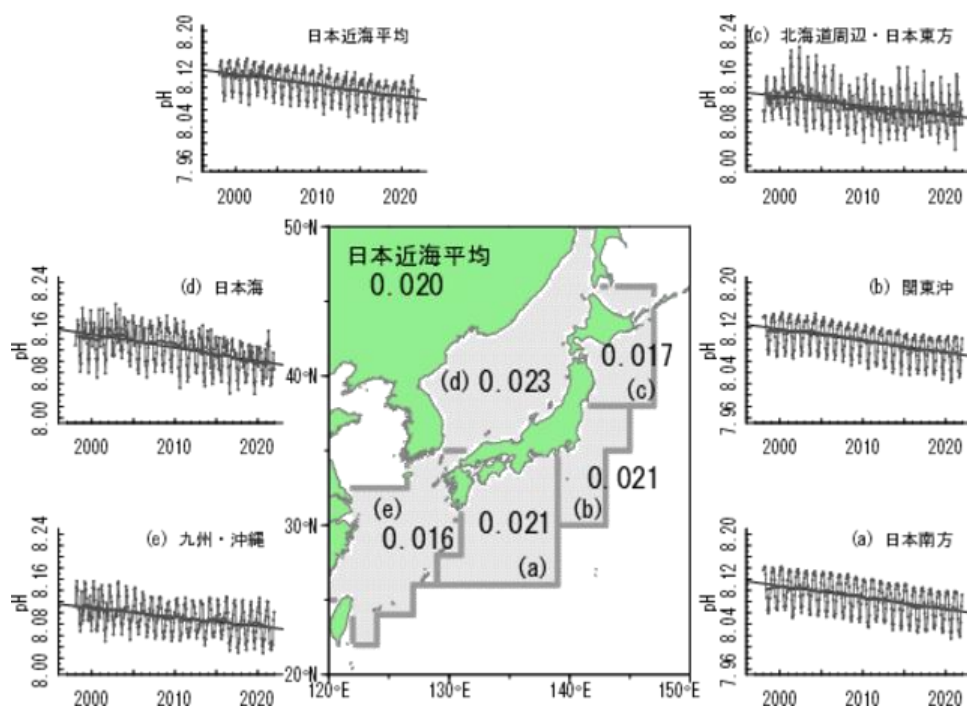


図 2.12-5 日本近海の pH の 10 年あたりの低下速度

現場水温における pH の値。時系列図の黒丸（及び細線）は海域内の pH の月平均値、太線はその 13 ヶ月移動平均、細破線は長期変化傾向を示す⁶²

(2) 北西太平洋における海洋酸性化

海洋酸性化の現状を把握するため、二酸化炭素濃度等のデータを用いて、北西太平洋（東経 137 度及び 165 度線）の表面海水中及び海洋内部の pH を見積もった（図 2.12-6、図 2.12-7、図 2.12-8）。その結果、表面海水中の pH は全ての緯度で明らかに低下しており、その低下率は、東経 137 度線では 1985 年から 2021 年までの 36 年間で 10 年あたり 0.014～0.021（平均 0.018）、東経 165 度線では 1996 年から 2021 年までの 25 年間で 10 年あたり 0.016～0.028（平均 0.020）であった。深さ約 150～800m における海洋内部の pH については、1990 年代以降、10 年あたり 0.011～0.031 低下していた。亜熱帯では、北部のほうが南部よりも低下率が大きい傾向がみられ、これは亜熱帯北部ほど二酸化炭素蓄積量が多いことと整合している（図 2.12-3）。

⁶² 気象庁ホームページでは、表面海水中の pH の長期変化傾向（日本近海）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend_jpn/pHtrend_jpn.html

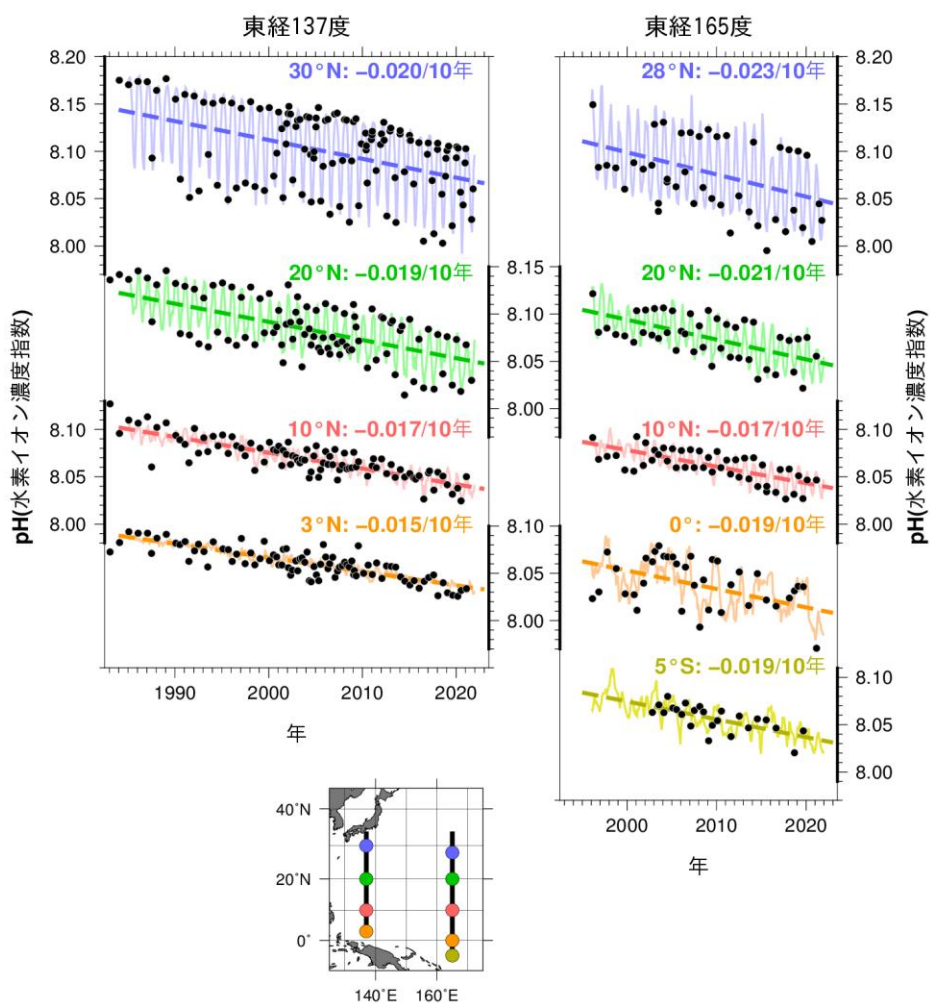


図 2.12-6 東経 137 度線（左上図）、東経 165 度線（右上図）の各緯度における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の長期変化⁶³

黒丸は表面海水中の pH の観測値、実線細線は解析値、破線は長期変化傾向を示し、右上の数字は 10 年あたりの変化率を示す。

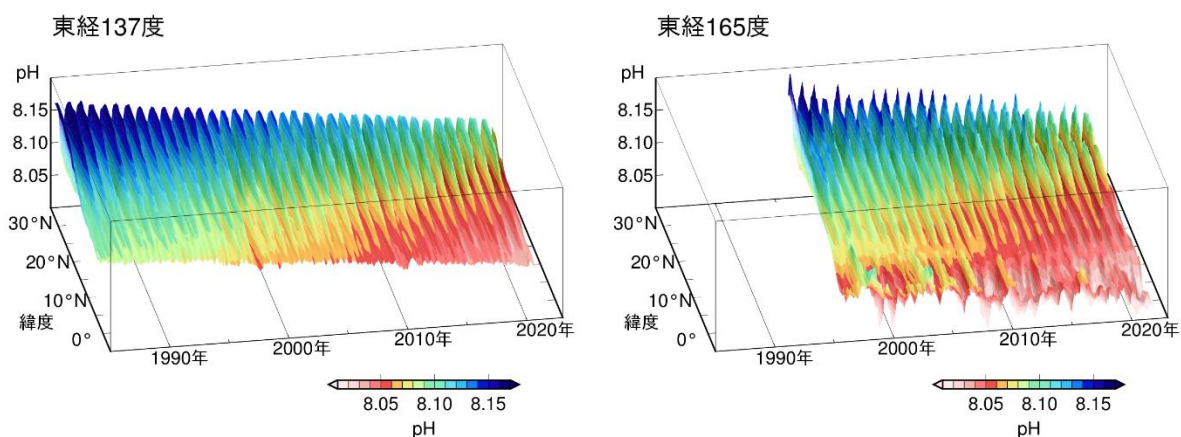


図 2.12-7 東経 137 度線（左図）、東経 165 度線（右図）における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の変化
エラー! ブックマークが定義されていません。

⁶³ 気象庁ホームページでは、表面海水中の pH の長期変化傾向（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaivou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html

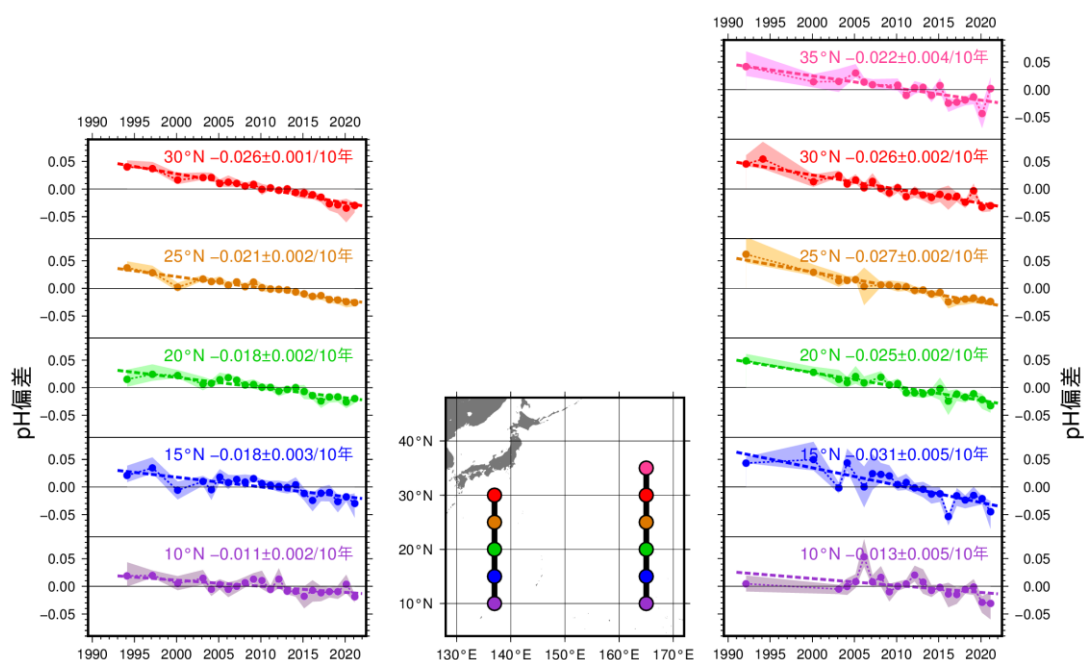


図 2.12-8 東経 137 度及び東経 165 度の各緯度における海洋内部での水素イオン濃度指数偏差の長期変化⁶⁴
 東経 137 度及び東経 165 度の各緯度における海洋内部での pH の偏差時系列を示す。偏差は、全観測期間の密度面ごと（深さ 150m から 800m）の平均値からの差として求めている。塗りつぶしは標準偏差、破線は長期変化傾向を示し、右上の数字は 10 年あたりの変化率（減少率）を示す。

(3) 世界における海洋酸性化

2.12.1 (2) と同様の手法に基づいて、海洋の表面海水中の pH 分布を推定し、世界の海洋の平均的な pH の長期変化傾向を解析した（図 2.12-9）。赤道付近や高緯度域など、二酸化炭素を多く含む下層の海水の影響を受ける海域では、表面海水中の二酸化炭素濃度が高くなっており、pH の値は低い。一方、中緯度域では、海面水温の分布に従って、緯度が高いほど pH の値が高い分布を示している。1990 年から 2020 年の解析期間において、全球の pH は 10 年あたり 0.018 の割合で低下しており、1990 年以降、およそ 0.06 低下した。

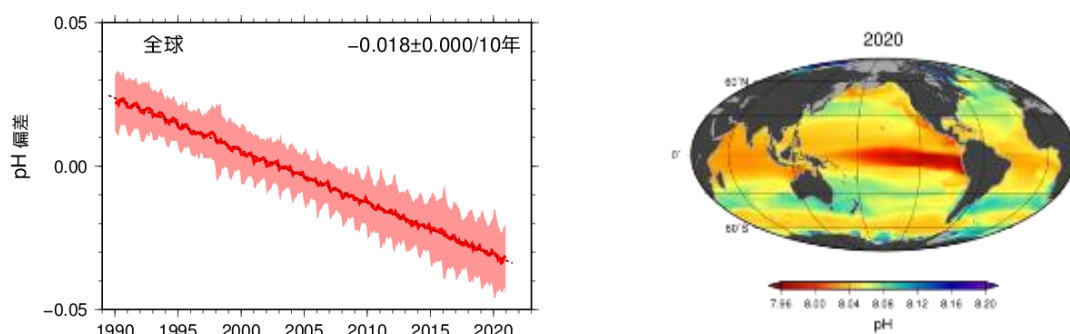


図 2.12-9 全球の表面海水中的水素イオン濃度指数 (pH) 偏差の長期変化（左図）と 2020 年における pH 分布図（右図）⁶⁵

左図は全球の表面海水中の pH の偏差時系列を示す。現場水温における pH の値。1991 年から 2020 年までの平均からの差を偏差としている。太線は偏差の平均値、塗りつぶしは偏差の空間的変動幅(±1σ)を示す。破線は長期変化傾向を示す。左図中の数字は 10 年あたりの変化率（減少率）を示し、"±"以降の数値は変化率に対する 95%信頼区間を示す。

⁶⁴ 気象庁ホームページでは、海洋内部の pH の長期変化傾向（北西太平洋）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHin/pH-in.html

⁶⁵ 気象庁ホームページでは、表面海水中の pH の長期変化傾向（全球）について公表している。

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHglob/pH-glob.html