

2.12 海洋の二酸化炭素と海洋酸性化⁵⁹

- 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。

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 度 ~ 34 度及び東経 165 度線上の南緯 5 度 ~ 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 年からの 39 年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は 1.5 ~ 2.1 $\mu\text{atm}/\text{年}$ （平均 1.8 $\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は 1.8 ~ 2.0 $\mu\text{atm}/\text{年}$ （平均 1.9 $\mu\text{atm}/\text{年}$ ）の割合で増

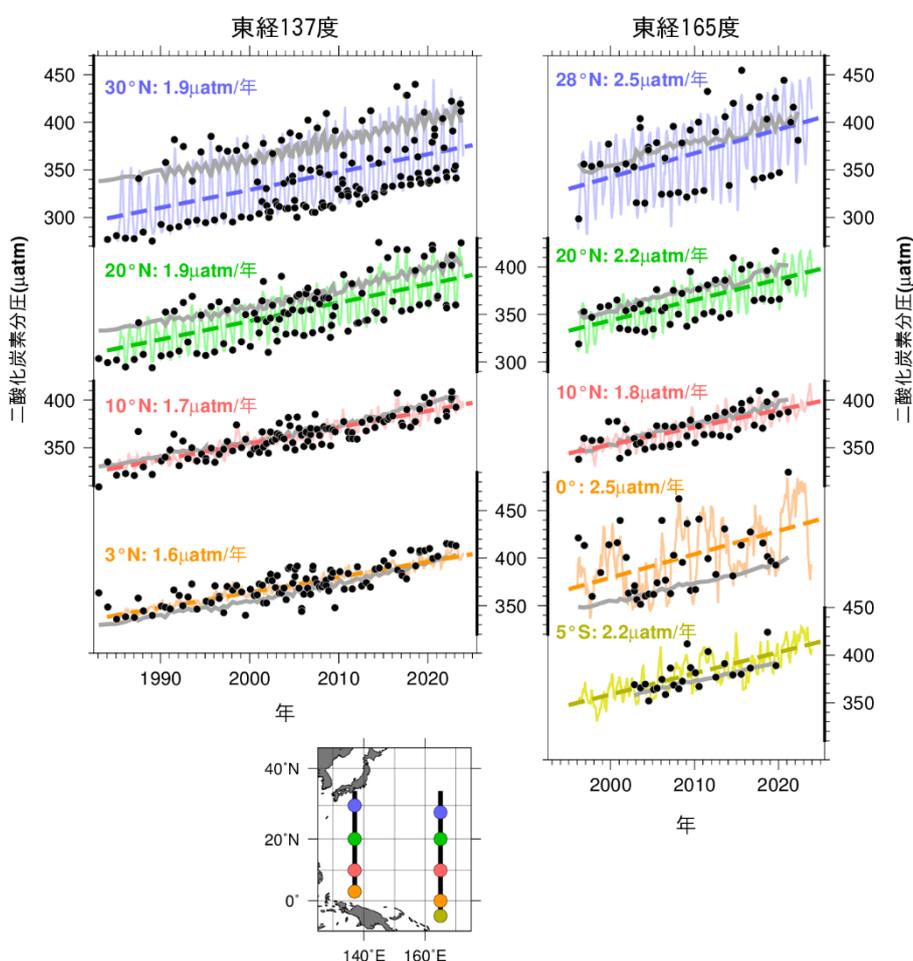


図 2.12-1 東経 137 度線（左図）及び東経 165 度線（右図）における表面海水中と大気中の二酸化炭素分圧の長期変化⁶⁰

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。

⁵⁹ 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/kaiyou/shindan/index_co2.html（海洋の温室効果ガスと海洋酸性化）

⁶⁰ 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/kaiyou/shindan/a_2/co2_trend/co2_trend.html

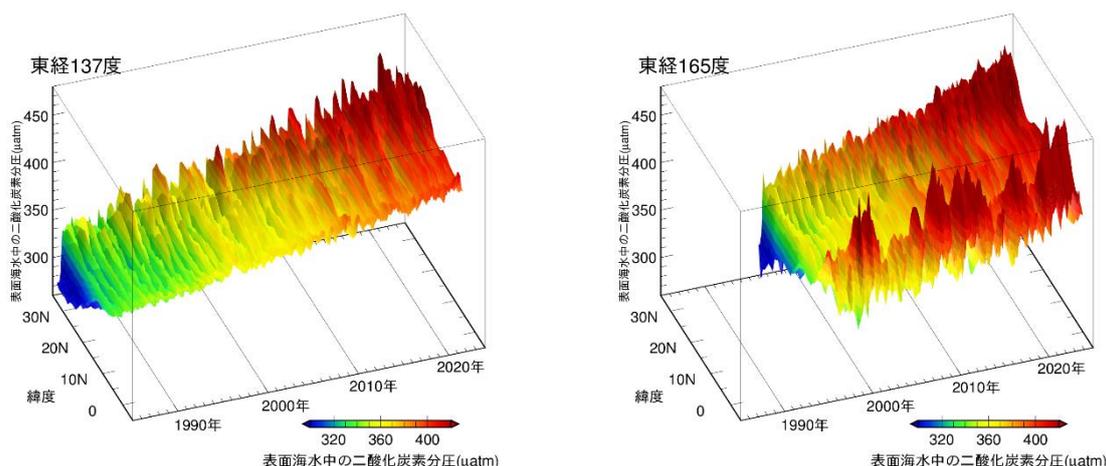


図 2.12-2 緯度ごとの表面海水中の二酸化炭素分圧の経年変化

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。

加している。東経 165 度線では、1996 年から 2023 年までの 28 年間で表面海水中の二酸化炭素分圧は 1.8 ～ 2.8 $\mu\text{atm}/\text{年}$ (平均 2.2 $\mu\text{atm}/\text{年}$) の割合で、また、大気中の二酸化炭素分圧は 1.9 ～ 2.1 $\mu\text{atm}/\text{年}$ (平均 2.0 $\mu\text{atm}/\text{年}$) の割合で増加している。

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 度及び北緯 24 度で 4～11 トン炭素/ $\text{km}^2/\text{年}$ (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。

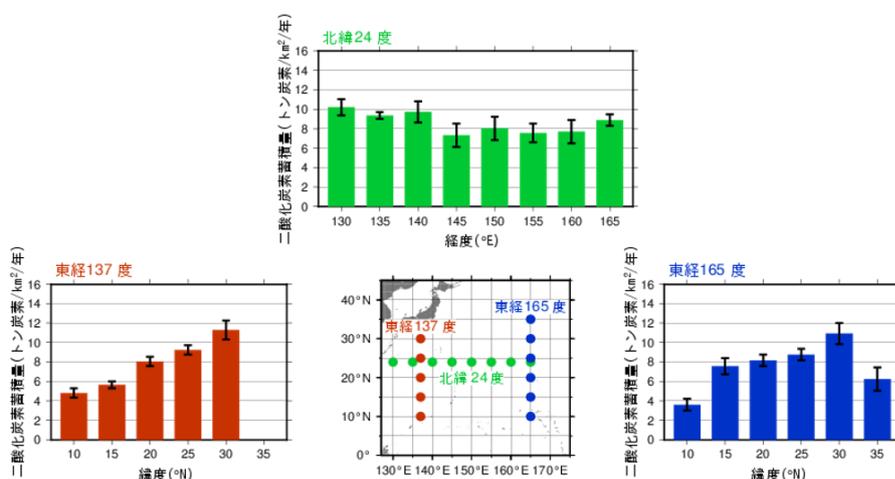


図 2.12-3 東経 137 度、東経 165 度及び北緯 24 度における緯度・経度ごとの 1 年あたりの二酸化炭素蓄積量と解析対象とした海域⁶¹

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～2023 年、東経 165 度が 1992 年～2022 年、北緯 24 度が 1992 年～2023 年。

⁶¹ 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/kaiyou/shindan/a_2/co2_inventory/inventory.html

(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、2022 年の二酸化炭素の吸収・放出の分布を示している。赤道付近やインド洋北部では、海洋から大気中に二酸化炭素が放出（赤色域）されており、それ以外の広い海域では、海洋が大気から二酸化炭素を吸収（青色域）している。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、1990～2022 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。また、海洋の二酸化炭素吸収量は増加傾向にある。

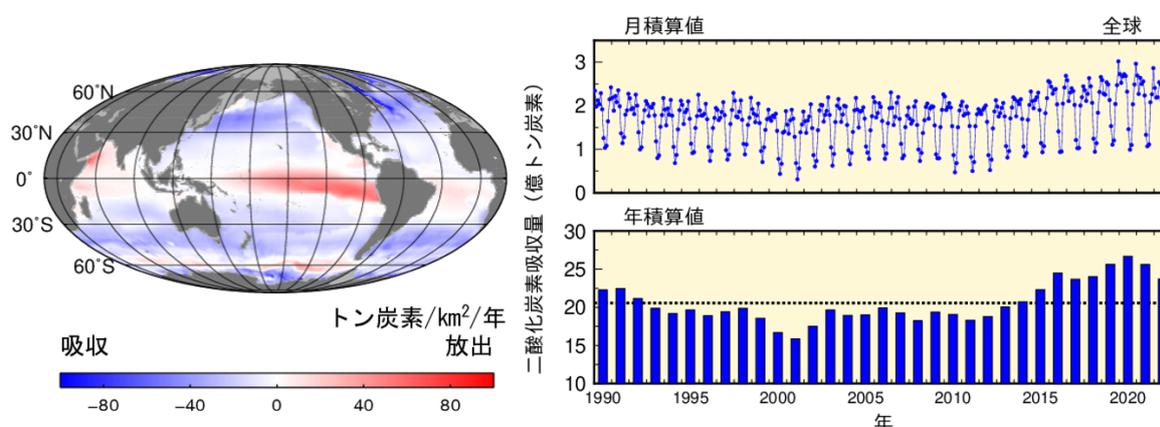


図 2.12-4 全海洋における二酸化炭素の吸収・放出の 2022 年の分布（左図）及び二酸化炭素吸収量の月ごと及び年間の積算値（1990～2022 年）（右図）⁶²

左図は 2022 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 1990～2022 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。

⁶² 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/kaiyou/shindan/a_2/co2_flux_glob/co2_flux_glob.html

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 0.021 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、北海道周辺・日本東方海域及び九州・沖縄海域で 0.019~0.021 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 0.024 と大きくなっている。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。

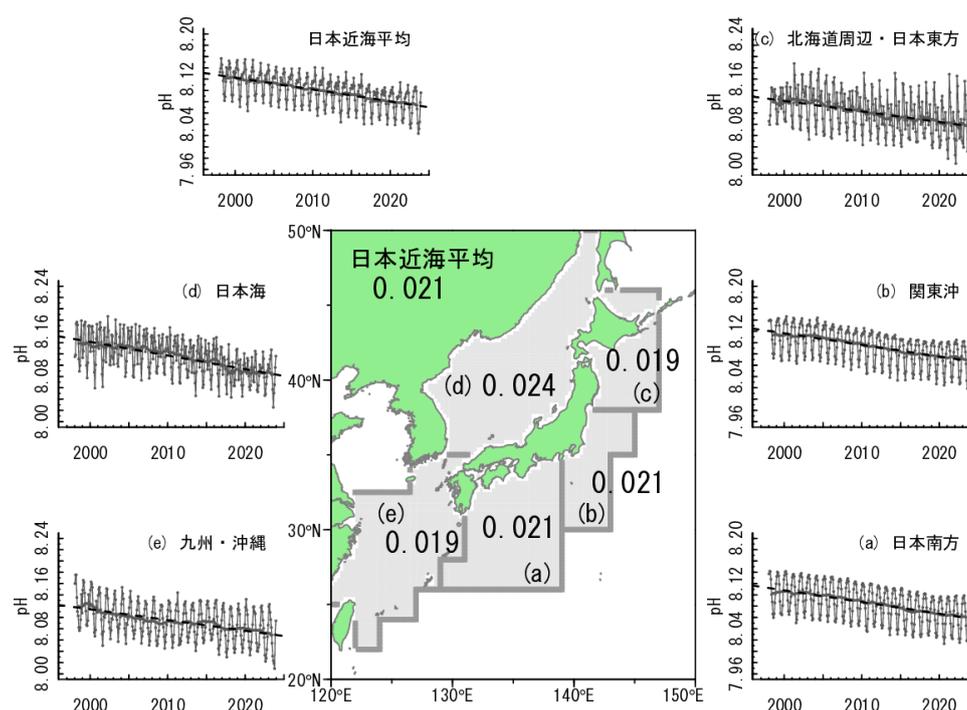


図 2.12-5 日本近海の pH の 10 年あたりの低下速度

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、破線は長期変化傾向を示す⁶³

(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 度及び東経 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 2023 年までの 39 年間で 10 年あたり 0.014~0.022 (平均 0.018)、東経 165 度線では 1996 年から 2023 年までの 28 年間で 10 年あたり 0.016~0.028 (平均 0.021) 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 0.013~0.031 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)。

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（日本近海）について公表している。

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

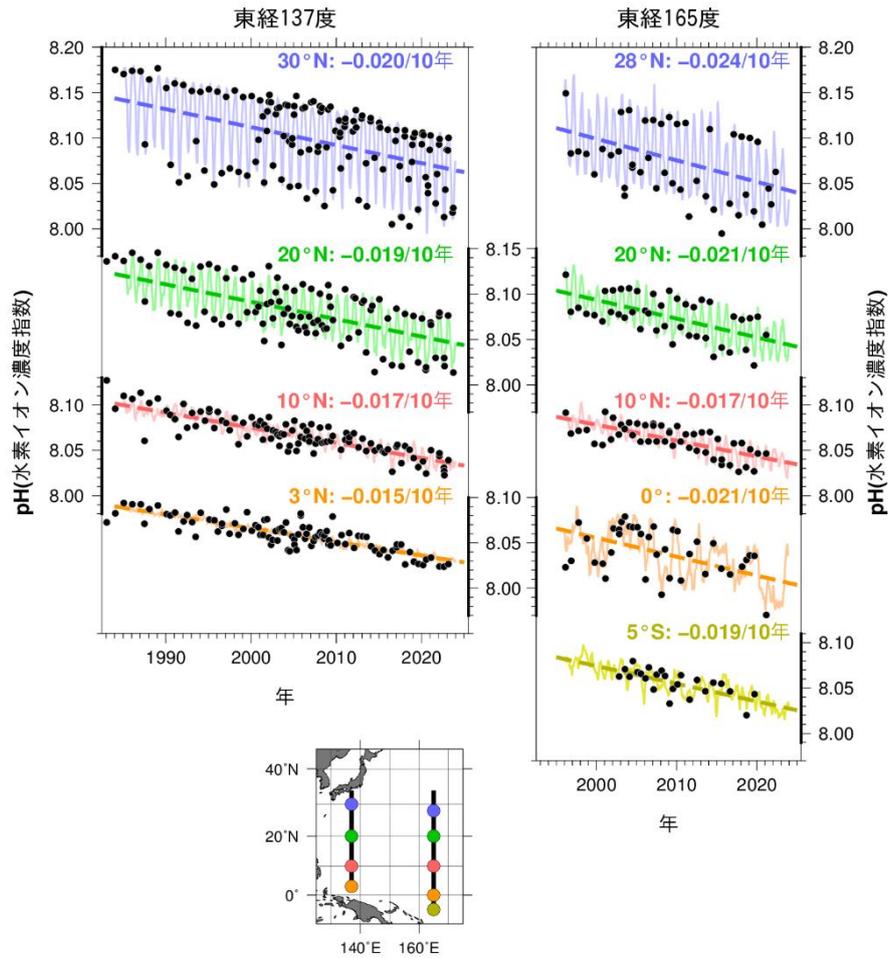


図 2.12-6 東経 137 度線（左上図）、東経 165 度線（右上図）の各緯度における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の長期変化⁶⁴
 黒丸は表面海水中の pH の観測値、実線細線は解析値、破線は長期変化傾向を示し、右上の数字は 10 年あたりの変化率を示す。

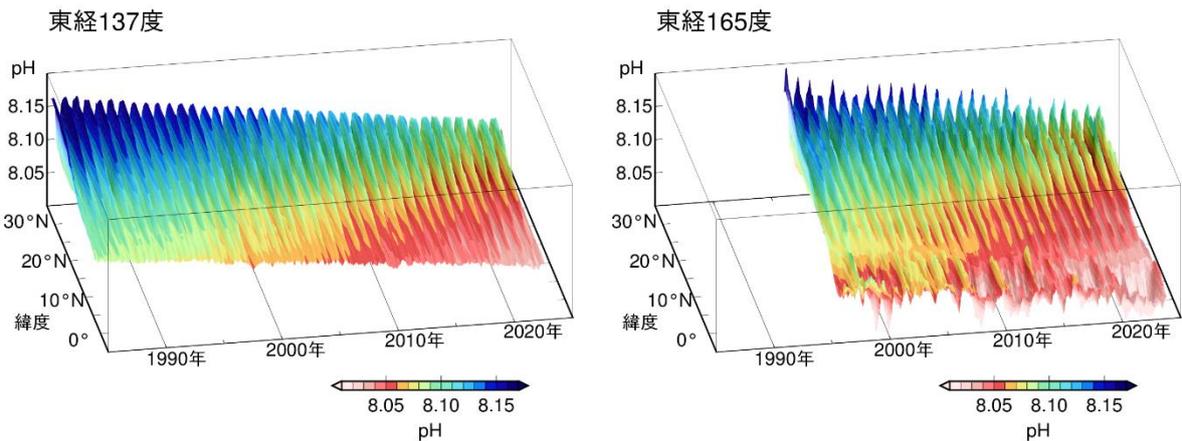


図 2.12-7 東経 137 度線（左図）、東経 165 度線（右図）における表面海水中的の水素イオン濃度指数（pH）の変化

⁶⁴ 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/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend/pH-trend.html

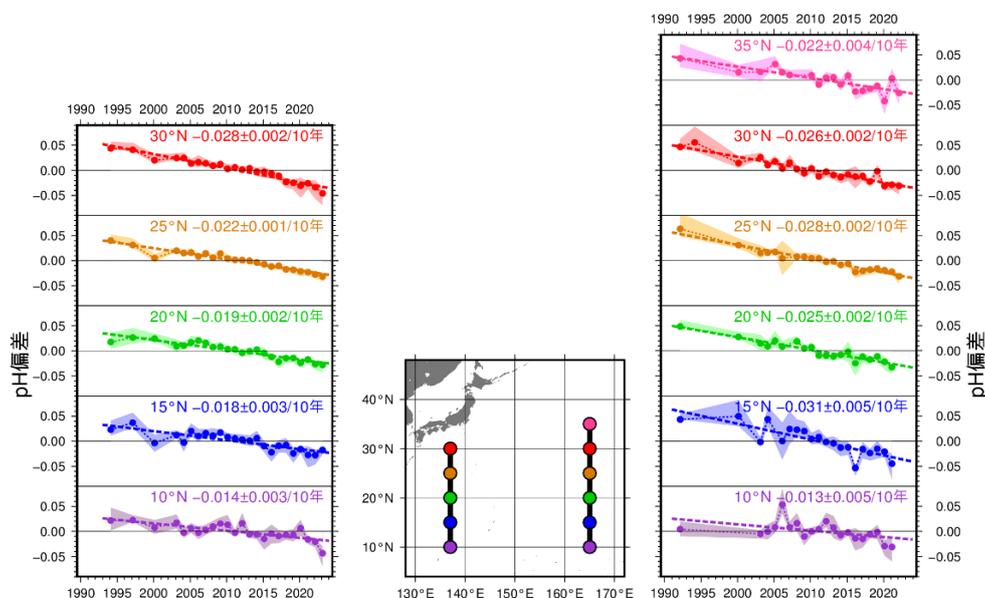


図 2.12-8 東経 137 度及び東経 165 度の各緯度における海洋内部での水素イオン濃度指数 (pH) 偏差の長期変化⁶⁵

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 2022 年の解析期間において、全球の pH は 10 年あたり 0.019 の割合で低下しており、1990 年以降、およそ 0.06 低下した。

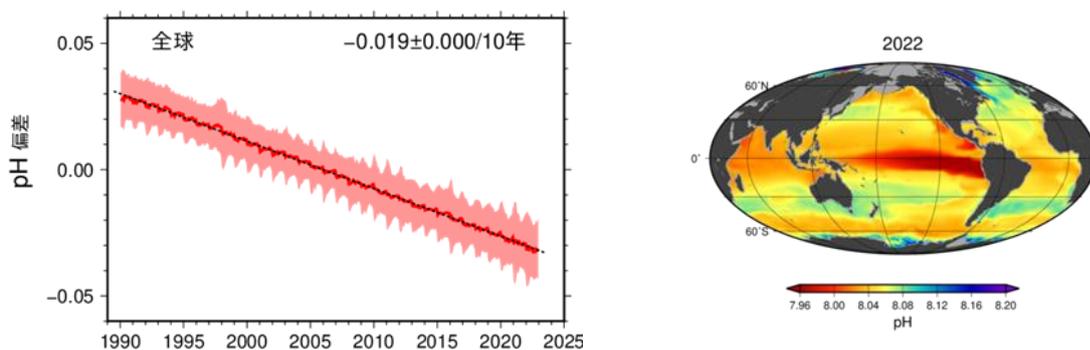


図 2.12-9 全球の表面海水中的水素イオン濃度指数 (pH) 偏差の長期変化 (左図) と 2022 年における pH 分布図 (右図)⁶⁶

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 ($\pm 1\sigma$) 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。

⁶⁵ 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/kaiyou/shindan/a_3/pHin/pH-in.html

⁶⁶ 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/kaiyou/shindan/a_3/pHglob/pH-glob.html