

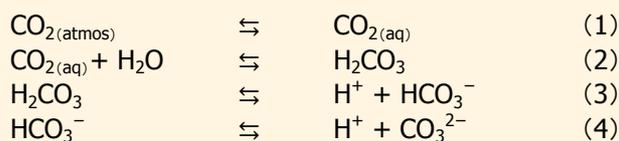
FAQ 3.3 | 人為起源の海洋酸性化は気候変動とどう関係するのか？

人為起源の気候変動と人為起源の海洋酸性化は、どちらも大気中の二酸化炭素濃度の増加によって引き起こされる。二酸化炭素(CO₂)濃度の上昇は、他の温室効果ガスとともに、地球表面から反射して返ってきた熱を閉じ込めることによって間接的に気候システムを変える。現在海水は人為起源二酸化炭素の約30%を大気から吸収しており、人為起源の海洋酸性化は二酸化炭素濃度の増加がもたらす直接的な結果の一つである。

海洋酸性化とは、主に大気からの二酸化炭素の取り込みを原因として長期間、一般には数十年からそれ以上にわたって pH が低下することを指している。pH は、酸性度を表す無次元の尺度である。海洋酸性化は、pH の変化の方向を言っているのであって、終点のことを言っているのではない。すなわち、海洋 pH は低下しているが酸性(pH<7)になることは予想されていない。海洋酸性化は、他の化学物質が自然に(火山活動の増加、メタンハイドレートの放出、純呼吸量の長期的変化など)、又は人為的に(窒素や硫黄の化合物の大気中への放出など)海洋に加えられたり、海洋から取り除かれたりすることによって生じる。人為起源の海洋酸性化とは、pH 低下の構成要素のうち人間活動によって生じる部分をいう。

1750 年頃以降、工業や農業の活動により二酸化炭素が放出された結果、世界平均の大気中の二酸化炭素濃度は 278 ppm から 2011 年には 390.5 ppm に増加した。大気中の二酸化炭素濃度は、少なくとも過去 80 万年間地球上で経験したことのない高濃度に達しており、我々人類がエネルギーを化石燃料に依存しているため、今後も増え続けることが見込まれている。現在までに、海洋は大気から約 155 ± 30 PgC^{【訳注】}の二酸化炭素を吸収しているが、これは工業化以前の時代以降の人間活動による二酸化炭素の総排出量(555 ± 85 PgC)のおよそ4分の1に相当する。この自然の吸収過程は、大気中の温室効果ガス濃度を大幅に低下させ、地球温暖化による影響の一部を最小限に抑えてきた。しかし、海洋への二酸化炭素の取り込みは海水の化学的性質に大きな影響を与えている。海面付近の海水の平均 pH は、産業革命の開始時の約 8.2 から 8.1 へと、既に約 0.1 低下している。予測されている将来の大気中及び海洋中の二酸化炭素濃度の推定値によると、今世紀末までに海面付近の海水の平均 pH は現在よりも 0.2~0.4 低くなる可能性がある。pH スケールは対数で表されているため、1 単位の変化は、水素イオン濃度になると 10 倍の変化に相当する。

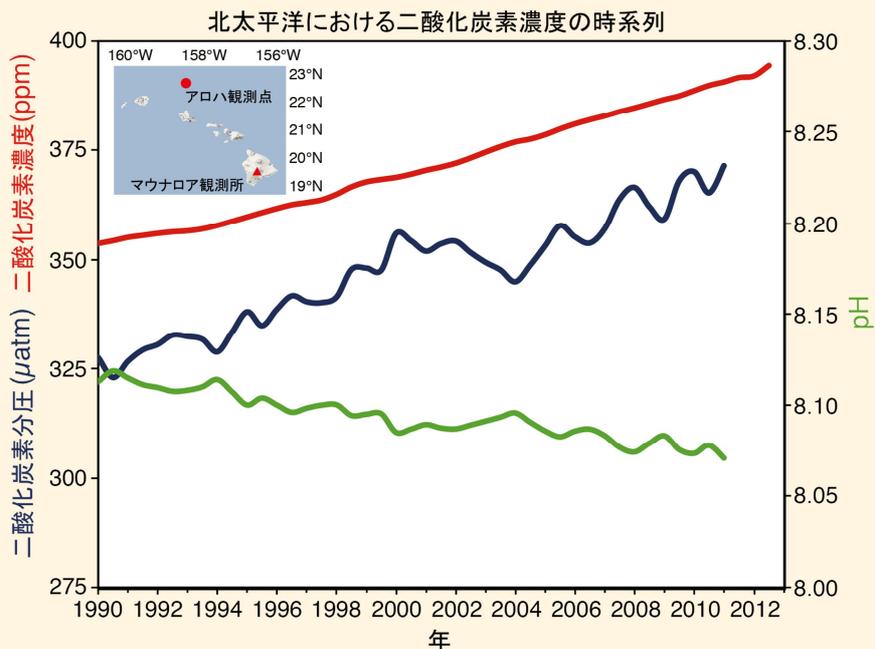
大気中の二酸化炭素が大気と海洋の境界面で交換されるとき、一連の 4 つの化学反応を通じて海水に反応する結果、以下の炭素化合物、すなわち溶存二酸化炭素(CO_{2(aq)})、炭酸(H₂CO₃)、重炭酸イオン(HCO₃⁻)の濃度が増加する。



上記の反応によって水素イオン(H⁺)が生成される。この海洋の水素イオン濃度の増加は、pH の低下又は酸性度の増加に相応する。通常の海水状態においては、生成される水素イオンの 99.99%以上が炭酸イオン(CO₃²⁻)と結合し、さらなる重炭酸イオン(HCO₃⁻)を生成する。このように、海洋に溶け込んだ人為起源の二酸化炭素は pH を低下させ、炭酸イオンを消費する。こうした反応は完全に可逆的で、海水中でのこれらの反応の基礎熱力学はよくわかっており、約 8.1 の pH のもとでは約 90%の炭素が重炭酸イオン、9%が炭酸イオンとして存在し、わずか 1%程度の炭素が溶存二酸化炭素の形で存在する。研究室、野外、モデリング研究から得た結果や地質記録の証拠は、海洋生態系が海洋中の二酸化炭素の増加とそれに伴う pH 及び炭酸イオンの減少に非常に影響を受けやすいことをはっきりと示している。

気候変動と人為起源の海洋酸性化は、互いに独立して作用するものではない。海洋に取り込まれる二酸化炭素は温室効果による温暖化には寄与しないが、海洋の温度上昇は海水中の二酸化炭素の溶解度を低下させるため、海洋が大気から吸収できる二酸化炭素の量も減ることになる。例えば、二酸化炭素濃度が工業化以前から倍増して水温が 2℃上昇した状態では、海水が吸収する二酸化炭素は温度上昇がない場合よりも 10%少なくなる(全炭酸 C_Tの増加分が 10%減、FAQ3.3 表 1^{【正誤表参照】}の第 4 列と 6 列を参照)が、pH はほぼ変化せずに維持される。このように、海洋の温度が上昇すると大気から二酸化炭素を取り除く能力が減るにもかかわらず、海洋酸性化は生じる。その理由は、より温度の高い海洋では重炭酸塩が炭酸塩に変換され、水素イオンを放出することによって pH を安定化させるためである。(次ページに続く)

FAQ 3.3(続き)



FAQ 3.3 図 1 | 1990～2011 年の期間にマウナロア観測所で観測された大気中の二酸化炭素のモル分率 (ppm) (上の赤線) と、ハワイ北の亜熱帯北太平洋のアロハ観測点で観測された海洋表面の二酸化炭素分圧 (pCO₂; 中央の青線) 及び海洋表面の pH (下の緑線) の平滑化した時系列 (Doney et al., 2009 による; データは Dore et al., 2009)。この結果から、海洋表面の pCO₂ の変化傾向は大気中の増加とおおむね整合するが、海洋過程の大規模な年々変動のせいで大気中の増加よりも変動が大きいことが見てとれる。^[正誤表参照]

FAQ 3.3 表 1 | 大気中の二酸化炭素が工業化以前より倍増した場合の、表面水における海洋 pH と炭素系物質のパラメータの変化。海水温が 2°C 上昇した場合としない場合も比較。^a

パラメータ	工業化以前 (280 ppmv) 20°C	工業化以前×2 (560 ppmv) 20°C	(工業化以前に対 する変化率 %)	工業化以前×2 (560 ppmv) 22°C	(工業化以前に対 する変化率 %)
pH	8.1714	7.9202	—	7.9207	—
H ⁺ (mol kg ⁻¹)	6.739e ⁻⁹	1.202e ⁻⁸	(78.4)	1.200e ⁻⁸	(78.1)
CO _{2(aq)} (μmol kg ⁻¹)	9.10	18.10	(98.9)	17.2	(89.0)
HCO ₃ ⁻ (μmol kg ⁻¹)	1723.4	1932.8	(12.15)	1910.4	(10.9)
CO ₃ ²⁻ (μmol kg ⁻¹)	228.3	143.6	(-37.1)	152.9	(-33.0)
C _T (μmol kg ⁻¹)	1960.8	2094.5	(6.82)	2080.5	(6.10)

注釈:

^a CO_{2(aq)} = 溶存 CO₂、H₂CO₃ = 炭酸、HCO₃⁻ = 重炭酸イオン、CO₃²⁻ = 炭酸イオン、C_T = 全炭酸 = CO_{2(aq)} + HCO₃⁻ + CO₃²⁻。

【訳注】 1 PgC = 1 GtC (炭素換算で 1 ギガトン = 10 億トン = 1000 兆グラム)。二酸化炭素換算では 36 億 6700 万トンに相当する。