

海洋酸性化は生態系に どのような変化をもたらすか ～式根島での観察から見たもの～

●文: シルバン アゴスティーニ(筑波大学下田臨海実験センター)・樋口 富彦(東京大学大気海洋研究所)

温暖化影響による海水温上昇はサンゴを含む海洋生物に大きな影響をもたらしている。同時に二酸化炭素排出量の増加がもたらす海洋酸性化は、海の生態系にさまざまな影響を及ぼすことが懸念されている。本号では、伊豆諸島の式根島において、火山活動によって海底から噴出する二酸化炭素が周辺環境にもたらす影響を調査研究している筑波大学のシルバン・アゴスティーニさんと、サンゴの環境ストレスの研究を行っている東京大学大気海洋研究所の樋口富彦さんに、調査研究の現状と意義について執筆いただいた。

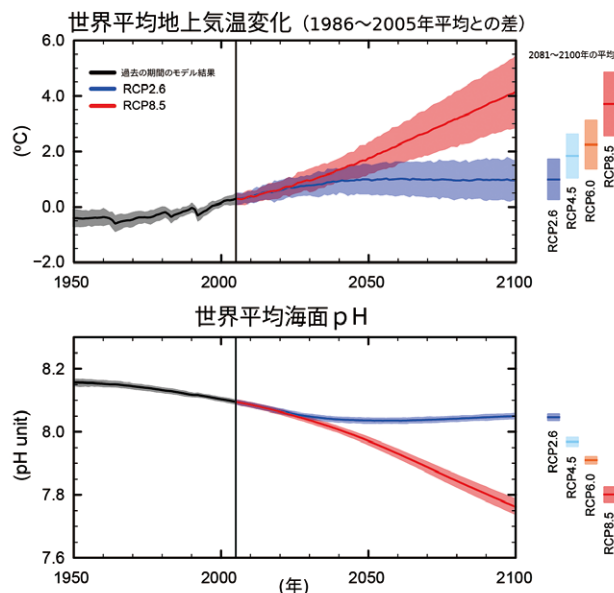
海洋酸性化とは

人間活動による二酸化炭素(CO₂)排出量の増加は、大気中のCO₂濃度を増加させ地球温暖化の原因となっている。さらに地球温暖化に加えて、排出されているCO₂の3割近くは海に溶け込み、海洋の酸性化を促進することが危惧されている。現在大気中のCO₂の濃度は約400ppmで海水のpHは8.1である。将来このままCO₂の排出が続くと大気中のCO₂濃度は1000ppm以上になり、海水のpHは7.8以下になる可能性が危惧されている(図1)。地球の歴史上これまでにない速度で環境が変化しており、その急激な変化は海洋生物に様々な影響を及ぼすと考えられている。過去100年間で既にCO₂濃度は300ppmから400ppmに増加しpHは8.3から8.1に減少している。

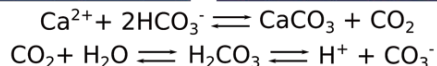
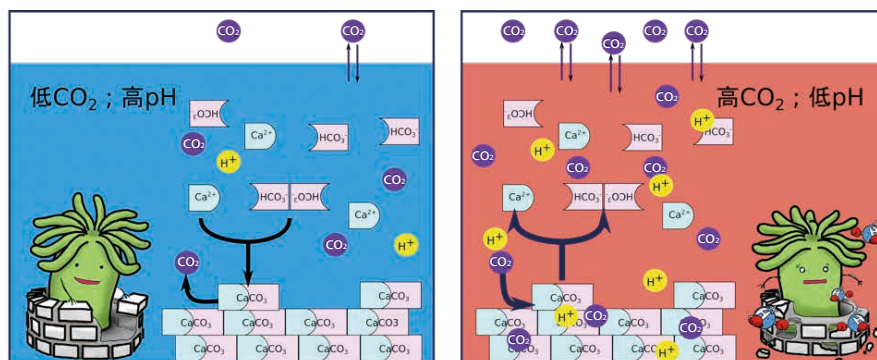
海洋酸性化による生物への影響

世界各地で様々な海洋生物を用いた研究が行われ、CO₂濃度の増加やpHの減少が多くの生物種に影響することが報告されている。海洋酸性化と聞くと悪影響しかないと思われるかもしれないが、植物はCO₂を使って光合成で生育するため、海藻などにとってCO₂増加は好都合のようだ。海藻以外についての研究では海洋酸性化による良い影響は少なく、ほとんどの生きものにとって海洋酸性化は負の影響を与えている。中でも一番影響を受けやすいのは貝やサンゴなどの石灰化する(炭酸カルシウムの殻や骨格を作る)生物であることがわかってき

た。これは、殻や骨格の主成分である炭酸カルシウムは、pHが高いほど作りやすく、ある一定のpHを下回ると溶けはじめてしまうからだと考えられている(図2)。



【図1】 IPCCレポートによる1950年から現在までの全球の温度と海域のpHおよびそれらの将来予測。将来予測はCO₂の低排出シナリオ(青線:RCP2.6)と高排出シナリオ(赤線:RCP8.5)。グラフの右側には、2100年に予測されている各排出シナリオの温度とpHが表示されている



【図2】 サンゴなど石灰化する生物にとっては現在の環境(低CO₂、高pH)では化学的に骨格が作りやすいが、将来CO₂濃度が増えるとpHが減少し、サンゴにとって骨格が作りにくい環境(高CO₂、低pH)になる

式根島周辺海域は 過去から未来までの海の姿!?

生物に対するCO₂の影響を調べる研究では、実験室内で1種類1個体を容器に入れ、CO₂の影響を調べるというのが一般的である。しかし、実際の自然界では種間の相互作用(食べる、食べられるの関係や、生息場所をめぐる競争など)があり、その作用を実験室で観察するのが難しいというのが問題であった。式根島周辺海域には、CO₂シープと呼ばれる海底からCO₂が噴出している場所があり、CO₂シープでは周囲の海水にCO₂が溶け込むことで、部分的にpHが低下している(図3)。つまり、この場所はCO₂増加により酸性化が進んだ未来の海と想定することができ、生態

系全体に対する海洋酸性化の影響を調べることが可能である。式根島周辺は黒潮の影響を強く受け、サンゴなどの熱帯性の生物と大型海藻を始めとする温帯性の生物が共存する生物多様性の高い海域である(図4)。また、CO₂濃度が世界でも低い海域であり、約300ppmと産業革命前後の世界の平均的なCO₂濃度に近い値が観測されている。そのため、CO₂シープから離れた海域は、100年前の海に似たCO₂濃度であると想定することができる。式根島には、様々なCO₂濃度の海域があり、過去から未来にかけての色々なCO₂濃度の時代の生態系応答を調べることができる。

式根島のCO₂シープで見られた現象

我々の研究グループは、過去(300ppm)、現在(400ppm)、未来(900-1500ppm)の海域をCO₂濃度に基づき選定し、生物群集の調査を行った。その結果、過去から現在にかけて既に大きな生態系の変化が生じており、石灰化生物の減少や小型藻類の増加が観察されている。さらにCO₂濃度が上昇した未来を想定した海域では、海底面積の90%以上が小型藻類に覆われていた。結果として、様々な生物の住処が失われ、生物多様性の低下が生じることとなっている(図5)。

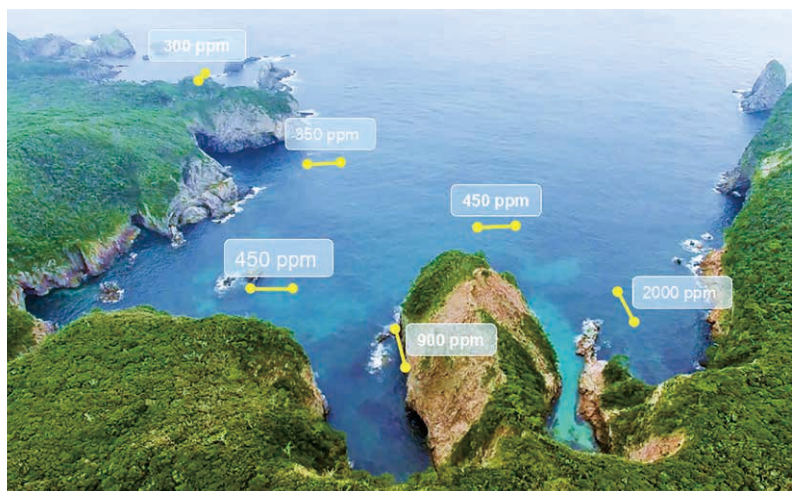


図3 式根島の御釜湾では複数の場所でCO₂の噴出が見られ、噴出の度合いによって様々なCO₂濃度で晒されている生態系を観察できる。左上の300ppmと書いてある小さな湾はCO₂の噴出が無い海域で、過去の海(産業革命前後のCO₂濃度)の生態系を観察できる



図4 式根島 CO₂シープ(過去の海 CO₂=300ppm)
多様なサンゴ、海藻、魚や動物が生息している

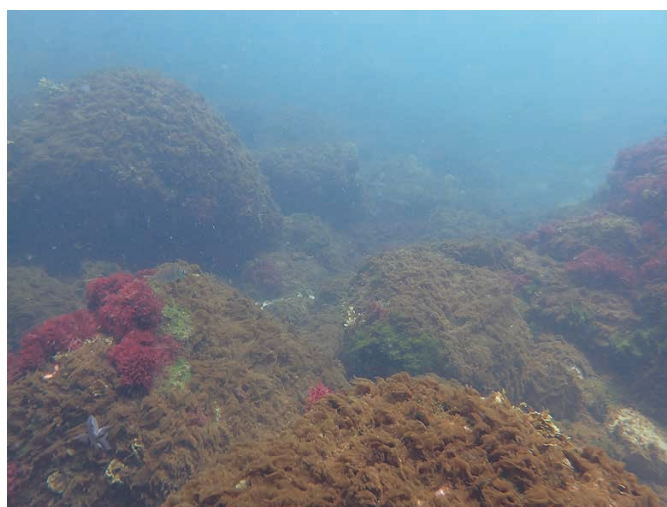


図5 式根島 CO₂シープ(未来の海 CO₂=900ppm)
生き物の多様性が低く、サンゴや大型海藻が無いため他の生き物の住処が少ない。小型の海藻がカーペットのように岩を覆っている

海洋酸性化の影響で多様性を失う

前述したように、CO₂の増加がサンゴなどの様々な生物に悪影響を与えることは実験室レベルではわかっていたが、生態系レベルへの酸性化の影響はこれまで不明であった。近年、CO₂シープでの研究を進めることで、実験室レベルでは単一の生物に直接影響しなかったCO₂濃度が生態系レベルでは同生物に影響を与えているということがわかってきた。例えば、式根島周辺海域で見られるアツパノリ、トサカマツなど多様な種類の大型海藻だが、CO₂シープではほとんど見る事ができない。そして、CO₂シープ周辺では魚類や無脊椎動物の多様性と数が減少している。これらの現象は、実験室では調べることが出来ないCO₂増加の間接的な影響であると考えている。実際、大型藻類にとってはCO₂の増加は成長に負の影響はなく、光合成の観点から考えるとむしろプラスに働く可能性が高い。しかし、高CO₂海域では大型の藻類が成長する前に小型藻類が成長し、空いているスペースを全て埋めてしまうことで、新たに大型藻類が入れなくなってしまう。

大型藻類やサンゴは、様々な動物の住処や餌資源になるので、生態系の中で重要な基盤となる。しかし、高CO₂海域ではサンゴや大型藻類など三次元的な構造を持つ生物が少なくなり、結果としてこれらを住処として使えない魚類などの動物も居なくなってしまう。このように海洋酸性化は、殻を溶かしたりする直接的な影響だけでなく、間接的にも作用することで生態系の「単純化」を引き起こしてしまうと考えられる。

その他のCO₂シープでは

我々のグループは式根島を拠点に研究を進めているが、CO₂シープは式根島だけにあるわけではない。これま

での研究報告を調べてみると、世界中10箇所のCO₂シープで研究が進められている。それぞれのCO₂シープで特徴が違い、例えば東京大学の研究チームが発見した沖縄県の硫黄島にあるCO₂シープでは、周辺海域と比べてソフトコーラルが多く、石サンゴからソフトコーラルへの生物群集シフトが如実に観察できる。また、パプアニューギニアでは様々なサンゴが生息する多様性が高い海域からハマサンゴが優先する多様性の低い海域に変化している。地中海のブルカノ島にもCO₂シープがあるが、酸性化した海域での多様性は低く、小型海藻が広がっているという他のCO₂シープに似た変化が見られる。このように、地理的には遠い複数の海域でも同じような変化が見られるため、将来の海洋酸性化は個体レベルのみならず生態系全体に影響を与えると考えられる(図6)。

将来のサンゴ

日本列島は沿岸域が南から北に長く伸びており、亜熱帯から温帯まで幅広くサンゴの分布域がある世界でも稀有な環境である。しかし近年では、環境省から「サンゴ大規模白化現象に関する緊急宣言」が発表さ

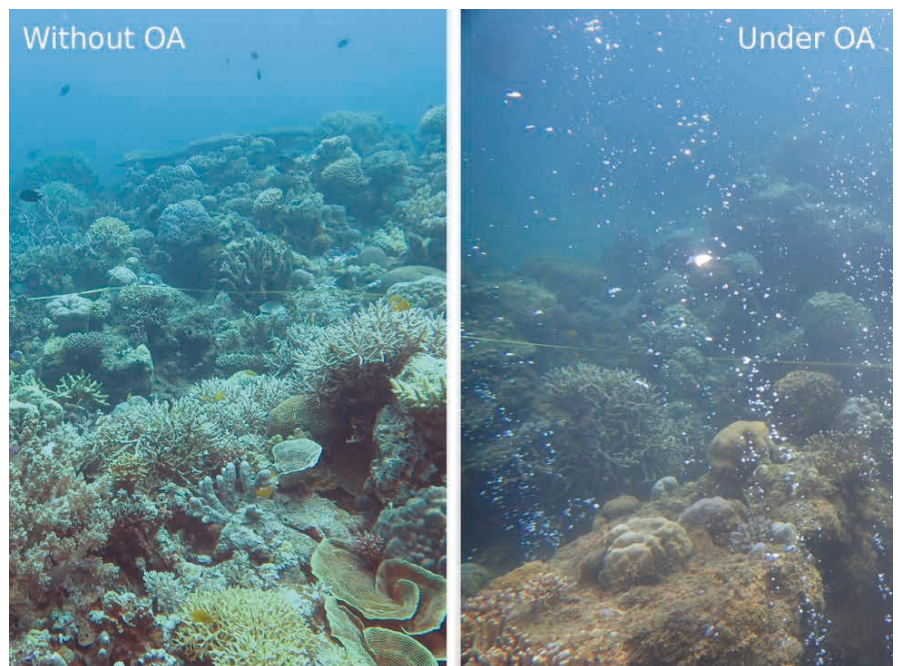


図6 パプアニューギニア Milne Bay のCO₂シープ(左:通常海域、右:酸性化海域)
通常海域では非常に多様性が高いサンゴ礁が広がるが、酸性化海域ではサンゴの種類が少ない。種類もハマサンゴが多く、小型藻類が広がっている

れ、地球温暖化による白化現象の頻発や病気の発生など南方のサンゴにとっては危機が迫っている。温帯域は、熱帯・亜熱帯海域と比べると低い水温帯であるため、現在の水温ではサンゴはそれほど多くの種類が生存できない。温暖化した海で考えると、沖縄などで高水温により悩まされるサンゴだが、将来温帯域の水温が上昇すればどんどん北へ生息域をシフトすることが可能である。サンゴの分布北上は既に始まっており、高知県などでは、近年大型海藻が減ってサンゴが増えている海域が多く見られる。式根島周辺でも過去10年で大型海藻(特にアラメ、カジメなど昆布科の仲間)が減り、サンゴが増えている(環境省モニタリング1000データより)。だが、サンゴはこのまま将来地球温暖化に合わせて本当に温帯海域に避難できるのだろうか? 水温のみで考えると分布北上は実際に可能であろうと考えられるが、同時に進行している海洋酸性化の影響も考える必要がある。2050年には温帯海域のpHやCO₂濃度はサンゴに悪影響を及ぼすレベルになり、たとえ水温上昇に伴い分布を北上しても海洋酸性化によって未来のサンゴには厳しい海洋環境になると予測されている。

どうすればいい?

これまでの研究成果から、将来の海洋酸性化が海の生態系を大きく変貌させることがわかった。このままCO₂濃度が上昇し続ければ、世界中の海で石灰化する生物であるサンゴや貝類、石灰藻などが減り、成長が早い小型藻類が繁茂することで、印象として寂しい海の景観が広がってしまうだろう。最新のIPCCレポートでは、世界中でCO₂濃度を減らす努力をしても、パリ協定で定められた「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃以下に収める」ことも難しいと指摘されている。それはCO₂の排出を減らしてもしばらく温暖化が続くからだが、海洋酸性化は大気中のCO₂濃度が安定すれば進行が止まる。海洋酸性化は大気中のCO₂濃度と直接関係があるため、大気へのCO₂排出を減らすことが一番の対策になる。また、サンゴだけでなく海洋生態系全体に言えるこ

とだが、問題は、温暖化や海洋酸性化に限らず、人間活動は様々な形で生物に影響を与え、その結果、複合的なストレスを生態系に与えていることである。地球温暖化や海洋酸性化をすぐに止めるのは難しいかもしれない。しかし、地域的なローカルストレスである富栄養化、貧酸素化や生活排水や農薬の流出などの汚染は、我々の生活と直接つながることから、毎日の生活で気を付ければ減らすことができる。もちろん、ローカルストレスを止めるだけでサンゴや環境を完全に守ることはできないかもしれないが、時間を稼ぐことはできる。その間に現在一番の問題であるCO₂の排出に関する社会の変化を促すなど、海洋環境を健全化するために一刻も早い対応が求められている。



式根島のCO₂シープでの調査風景



Sylvain Agostini シルバン・アゴスティエーニ

筑波大学下田臨海実験センター 助教
フランス出身、マルセイユ大学海洋生物修士課程修了。
2009年静岡大学環境・エネルギーシステム博士課程修了。
博士(理学)取得。2012年から現職。主にサンゴの生態生理学の研究を進めている。2017年にタラ号太平洋プロジェクト(<https://jp.oceans.taraexpeditions.org/>)で日本の科学責任者として参加。自然に酸性化されている海域を使って海洋酸性化の影響を調べている。



樋口 富彦 ひぐち・とみひこ

東京大学大気海洋研究所特任研究員。1981年大阪生まれ。2000年ダイビングに魅せられ沖縄に移住(琉球大学理学部海洋自然科学科に入学)。2009年琉球大学理工学研究科海洋環境学専攻修了、博士号(理学)を取得。琉球大学博士研究員、静岡大学特任助教を経て現職。主に造礁サンゴの白化現象など環境ストレス応答や骨格形成メカニズムについて研究を進めている。日本サンゴ礁学会代議員。最近ではサンゴの骨と同じ炭酸カルシウムからなる魚類の耳石についても研究中。