

# サンゴ礁は脆弱か？

サンゴ礁は、地球温暖化による海面上昇、CO<sub>2</sub>濃度の上昇による「海洋酸性化」、そして温度上昇に対して脆弱である、という意見がある。これは本当にそうなのだろうか？



杉山 大志 SUGIYAMA Taishi

一般社団法人 キヤノングローバル戦略研究所 上席研究員

## 海面上昇——サンゴ礁は成長する

太平洋には、平坦なサンゴ礁がラグーンを囲んでいる環礁が無数に浮かんでいて、飛行機からみると幻想的な風景が広がる。筆者が訪れたキリバスもそうだった。

島の本体は、古いサンゴ礁の上に、砂が堆積してできている。砂は、サンゴの破片や有孔虫という小さな殻を持つ微生物の死骸から成る。固いサンゴが成長して岩礁ができたり、無数の小さな有孔虫が増殖して砂が供給されたりして、サンゴ礁は常に成長する。

さらにその外側に、サンゴ礁が島全体を取り囲み、その嶺——礁嶺と呼ばれる——で外洋の大きな波は碎かれる。このため、人が住む島自体には、ふだんは波がほとんど届かない。つまりサンゴ礁は自然の防波堤として機能している。大洋ではたいてい大波が立っているので、環礁のビーチでほとんど波がないのは奇跡的に感じる。目を凝らすと大波がかなり沖合の礁嶺で砕けて水しぶきを上げているのがみえる。

筆者が訪れたキリバスでは、標高が最大で2 mほどしかない。それで、温暖化による海面上昇によって国土が損なわれることが懸念されている。

ただし過去70年のデータでは、海面は上昇したものの、意外なことに、首都のあるタラワ島等の面積は増えていた。これは、砂浜は、海によって浸食される反面、サンゴの成長や有孔虫の増殖による砂供給を受けて成長するからである。同様な面積増加は、他の多くの環礁でもみられてきた<sup>\*1, 2</sup>。

地球温暖化によって予測される海面上昇の速さは、2000年から2100年までの100年間で最大80cm程度とされている<sup>\*3</sup>。

しかし、この速さを上回る海面上昇は、過去に例があった。2万年前の氷期には、カナダ等に今の南極より

も大きな氷床（氷の塊）が発達し、その分海水は減った。そのため海面は今より100 m以上も低かった。この氷期のあと、1万6,000年前から6,000年前にかけては氷床が溶けて、海面は平均で100年に1 mの速さで上昇した。最も早い時期には、100年あたりで5 mも成長した<sup>\*4</sup>。サンゴ礁はこの海面上昇に追従し、現在見られるようなサンゴ礁地形を造った。

今後も、サンゴや有孔虫などの活動によって、環礁は海面上昇に自然に追従していく。ただしこれによって完全に追従できるとは限らない。人工物が上に建造されてしまえば、もちろん自然には海面上昇に追従できない。また、水質汚染、温暖化による水温上昇、CO<sub>2</sub>増加による海水酸性化等の原因によって、サンゴが劣化（衰えたり枯れたりすること）・白化したり（サンゴと共生している褐虫藻が死んでサンゴが色を失って白くなり、やがて死滅してしまうこと）、有孔虫の活動が低下する懸念がある。それで砂の生産が衰えれば、建築物や人々がリスクに曝されうる。

ただし、建築物や人々を守ることは、堤防の建設等のよく知られた土木工事で実現できる。これは海岸浸食、地盤沈下、高潮等への対応として既に日々行われている工事の延長であって、特段難しいことではない。

## 高温・高CO<sub>2</sub>濃度でサンゴ礁はどうなるか

個別のサンゴ礁が劣化・白化する要因は複合的ではあるものの、サンゴ礁の白化は地球規模かつ複数箇所で、同時かつ大規模に起きていることから、地球温暖化との科学的因果関係は強いという意見がある<sup>\*5</sup>。

例えば、茅根創氏は2011年に以下のように述べている<sup>\*6</sup>。

「CO<sub>2</sub>濃度が388ppmの現在、すでに白化が頻繁に起こるようになり、産業革命以前の倍の濃度の

560ppmになると、サンゴ礁は藻場やがれきに代わってしまい、石灰化より侵食が上回ってサンゴ礁地形自体が崩壊し、水没してしまうことが予想されている。サンゴ礁を維持するためには、現在の二酸化炭素濃度をこれ以上できるだけ上昇させないことが必須である」

ただし、地球温暖化と関係があるとされるサンゴ礁の地球規模での白化現象は1997年に初めて発見された新しい事象であり、まだ研究の歴史は浅い。そして近年になって、サンゴ礁の地球温暖化に対する脆弱性に疑問を呈する研究も提出されるようになってきた<sup>\*7, 8</sup>。サンゴ礁というのはかなり強靱な生態系であると考える専門家も増えている<sup>\*9</sup>。

サンゴが酸性化に弱いという初期の研究の報告には問題が多かった。21世紀末まで実現しえないような極端に高いCO<sub>2</sub>濃度の実験だったり、CO<sub>2</sub>ではなく塩酸による効果をみる実験だったりしたものも多く、あまり現実の環境影響評価の参考にならないものもあった<sup>\*10</sup>。IPCC第5次評価第2部会報告書(以下、IPCC AR5 WG2と略す。第2部会は環境影響評価を所掌する)でも、2100年になっても実現しえないような高いCO<sub>2</sub>濃度の存在下における悪影響を強調するという、不適切なまとめ方になっていた<sup>\*11</sup>。

現実的な予測の範囲では、海洋が「酸性化」とすると言っている方はややオーバーで、海水のアルカリ度が少々低下するだけである。海洋のpHは現在は8.0程度であり、最もCO<sub>2</sub>排出量の高いRCP8.5シナリオにおいても、21世紀末には7.8に留まる(pHは7.0が中性である)というのがIPCC AR5 WG1の予測である。

ではpH7.8までのCO<sub>2</sub>による酸性化はどのような影響をおよぼすか。実験室でのデータのレビュー論文によれば、炭酸カルシウムの殻をつくる生物は、最大で25%程度の成長の遅れがみられる。他方で、海藻などの多くの生物は、逆に成長が早くなる、とされている。高いCO<sub>2</sub>濃度は植物の光合成にとっては都合が良いからである。なおサンゴの種類によってはCO<sub>2</sub>濃度の上昇で成長が速くなる。これはサンゴも(より正確に言えば、サンゴと共生する褐虫藻が)光合成をするものであり、CO<sub>2</sub>が多いと光合成が促進されるからである<sup>\*12, 13</sup>。

次に、実験室から屋外に出てみよう。サンゴ礁が長い地質年代を経て形成されてきたという事実は、高い水温やCO<sub>2</sub>濃度等、多様な環境で生きてきたことを示唆する。CO<sub>2</sub>濃度はそもそも、光合成の影響を受けて、1日の間でも場所によっても変動が大きい。そして実際、地球上で観察される海洋のCO<sub>2</sub>は多様であり、海流(湧昇流)や河川からの流れ込み、海藻植生等の影響によって、pH7.8やそれよりも酸性の場所も多く存在し、そのような場所でもサンゴが生息している<sup>\*14</sup>。

例えばラグーンによっては温度もCO<sub>2</sub>濃度も高いが、そこでも多くのサンゴが生息している。例えばニューカレ

ドニアのラグーンでは、温度が高く、酸性度の高い水(pH7.8かそれ以下)でありながら、そこに生息するサンゴが多数見つかると豊かな生態系を成していることが見つかった。

初期の研究では、温暖化や酸性化の影響評価についても、実験室での評価に留まることが多く、自然環境の複雑性や強靱性についての再現には限界があった。このニューカレドニアのラグーンは、2100年に予想されるような(最悪の)地球温暖化を先取りした環境になっているが、そこでサンゴ礁が観察されたわけだ<sup>\*15</sup>。パラオでも同様に酸性度の高い水の中で豊かなサンゴ礁が生息していることが確認された<sup>\*16</sup>。

ベルシャ湾でも高水温環境でサンゴが生息している。このように多様な環境下でサンゴが生息できる理由はよくわかっていないようだ。例えば白化現象は、サンゴがより高温に耐性のある褐虫藻と入れ替えるための一時的なプロセスに過ぎないのではないかと、という説などがある<sup>\*17</sup>。

IPCC第5次評価第2部会報告書(AR5 WG2)の著者の1人でもあるHendricks氏は、既存の研究を広範にレビューした結果、酸性化に対する生物の応答は様々であるものの、21世紀末までのところ、全体としてはさほど重大な影響はないのではないかと、結論している<sup>\*18</sup>。

### サンゴ礁が消えるとどうなるのか

高いCO<sub>2</sub>濃度や高温の下で育つサンゴがいるとはいえ、成長が遅くなるサンゴも多くあることが指摘されている。すると、サンゴ礁が死滅することがあるかもしれない。そうすると、海の風景はどうなるのだろうか。

実はサンゴ礁が死滅した例は多くある。それはCO<sub>2</sub>以外の理由によるものだった。

例えばジャマイカの海岸には1975年まではサンゴ礁が広がっていたが、1995年までには壊滅した。これは、以下のようにして起きた。

- ①魚が乱獲された。
- ②魚による捕食圧が減ったウニが大発生し、後に病気で、これも大量死した。
- ③その結果、魚・ウニによる海藻への捕食圧が大幅に減じたため、海藻が繁茂した。
- ④サンゴは海藻との競争に敗れて死滅した。

一度海藻が繁茂するようになると、サンゴはそこで生育していくことが難しくなるので、この変化は一度起きると準安定状態となって元に戻らなかった(このような現象は相転移「フェーズ・シフト」と呼ばれる)<sup>\*19</sup>。

このようにしてサンゴ礁はなくなった。だがそれで、ジャマイカの経済が大きく傾いたということはない。ジャマイカの人々はいまも普通に暮らしているし、すてきなリゾー

トピーチもある。

CO<sub>2</sub>濃度が上昇し、温度も上昇すると、サンゴによっては成長が遅くなったり死んだりする。その一方で、サンゴのライバルである海藻は、CO<sub>2</sub>濃度が上昇し温度が上がると発育が盛んになる。すると相対的にサンゴが負けて、海藻が勝つ場所が出てくるかもしれない。

サンゴ礁というとカラフルで自然が豊かなイメージがあるので、それが大規模になくなるというとても悪いことのような気になるかもしれない。だが、サンゴ礁もきれいだ、海藻の生えた海もきれいだ。

式根島の海中温泉等、地底から火山性のCO<sub>2</sub>が発生している場所は多くある。筆者は実際にそこに潜ってみたが、藻が生えて魚がいる豊かな生態系になっていた<sup>\*20</sup>。

サンゴがなくなっても、生態系がなくなるわけではない。

### CO<sub>2</sub>濃度も温度も歴史的に変化してきた

サンゴの将来を占うために、過去がどうだったかを調べてみよう。

歴史的にみると、今は大気中のCO<sub>2</sub>濃度が低い部類に入る。3,000万年前以前は1,000ppmを超えた時期も長かった<sup>\*21</sup>。

5,500万年前の暁新世始新世温暖化極大期（Paleocene Eocene Thermal Maximum: PETM）には、CO<sub>2</sub>濃度は1,500ppmを超え、地球の平均気温は6℃以上急上昇し、現在よりも10℃以上高くなった。表層海水のpHは0.25から0.45低下した。だが生物はこの状況に適応した。のみならず、温暖な気候と高いCO<sub>2</sub>濃度を活用して、北極圏まで植物が繁茂し、動物が増える活況を呈した<sup>\*22</sup>。このきっかけは大規模な火山活動によるCO<sub>2</sub>増大であったとする説が有力なようだ<sup>\*23</sup>。

時代が下って過去300万年の間でみると、熱帯の海面水温は、10万年周期で繰り返された氷期・関氷期サイクルにおいて3℃から4℃程度の上下を繰り返しつつ、トレンドとしては徐々に下がってきた<sup>\*24、25、26</sup>。

また約13万年前に、最終氷期の一つ前の氷期が終わるときにできたあるサンゴ礁の化石からは、その地点の海水温度は22℃から29℃まで大幅に上昇したが、この上昇前も上昇後も、サンゴ礁の形成が続いたことがわかっている<sup>\*27</sup>。

今後、温度が上昇しCO<sub>2</sub>濃度も上昇するとどうなるか。

生態系全体としてはむしろ栄えると考えられる。自然生態系への温暖化影響評価研究で有名になったクリストマスは、近年になって、地球温暖化によって暖かい地域が増えるならば、生物多様性はむしろ高まるとしている<sup>\*28</sup>。温度の高い地域のほうが生物多様性は高いからだ。これは光合成が活発で純一次生産が高くなることに

よるが、それ以上に、暖かいと化学反応速度が上がり、生物の進化が急速になることが効いてくる。このため温度の上昇に対して種の多様性は加速度的に高くなる<sup>\*29</sup>。

また近年になってCO<sub>2</sub>濃度が高くなった結果、光合成が活発になり、地上の植生が増大していることが衛星観測によって確認されている。これは地球緑色化（global greening）と呼ばれている<sup>\*30</sup>。海洋における光合成の増大の測定結果はまだ寡聞にして知らないが、その存在自体はまず間違いないだろう。高いCO<sub>2</sub>は多くの生物にとっては便益である。室内のCO<sub>2</sub>濃度は1,000ppmにまで達することはあるが、人間の生活に支障はない<sup>\*31</sup>。ちなみにトマトの温室栽培では生育を早めるためにCO<sub>2</sub>濃度を2,000ppmに高めることが行われている<sup>\*32</sup>。

ただし生態系全体として繁栄するといっても、高温と高いCO<sub>2</sub>濃度に弱い生物は、競争に負けて、相対的に減少していくことになる。実際に、PETM期には、サンゴ礁を形成する生物の一部が死滅したことがわかっている。しかし、炭酸カルシウム等の殻を持つ生き物も、甲殻類も、多くの生物は繁栄を続けた。サンゴ礁をつくり上げる造礁活動も、停止した形跡はないようである。造礁活動が停止した記録は遙かに古く、2億5,000万年前のペルム紀末の大絶滅時に400万年にわたって停止した例が知られるのみであるようだ<sup>\*33</sup>。

このように、温度もCO<sub>2</sub>濃度も、歴史的に大きく変動してきた。それでも、特定の生物がどうなるかは別として、生態系の繁栄に支障はなかった。

### それで、サンゴ礁はどうなるのか？

サンゴ礁の脆弱性に関する科学的知見は、いま急速に蓄えられつつあるところであり、まだはっきりした結論は出ていない。

知見の現状を、窪田薫氏は以下のようにまとめている<sup>\*34</sup>。

「温暖化と酸性化の進行とともに、海洋生態系が我々がこれまでに知っていたものとは大きく変化することになることは疑いの余地がありません。変化がないと考えるのはあまりに楽観的すぎます。……勝者と敗者が分かれば、それらが複雑に関係しあって将来のサンゴ礁が形作られるでしょう（その力学の中で礁を形成できる種が卓越するかどうかは不明）。また人間の直接的関与（サンゴ礁保全や漁業規制など）もまた大きな要素になってくるはずですよ。

ここまで複雑になってくると、人類が今後どれだけCO<sub>2</sub>を排出するかの予測もままならない現状を鑑みると、生態系の変化の予測など空想に過ぎないと感じるわけです。

複合ストレス飼育実験（温暖化・酸性化・栄養塩・光量変化など）やメソコスム実験（個体ではなく生態系全体を実験対象にす

る)は今後も続き、最新鋭のコンピュータを駆使して『どこのサンゴ礁がもっとも危うい』といった予測は繰り返されることと思います。しかし、結局のところ『その時になってみないとわからない』というのが僕個人の私見です」

前出の茅根氏も窪田氏も、サンゴ礁生態系および人間にとっての悪影響が大きい可能性が高いと考えており、CO<sub>2</sub>排出削減が重要であるとしている。ただし「悪影響が大きい」かどうか、CO<sub>2</sub>排出削減が「どの程度」重要であるかについて、筆者は、他のリスクと相対化しない限りは結論を出せないと考えており、立場が異なる。

地球の温度上昇も海洋の酸性化もサンゴ礁に何らかの影響を及ぼすことは間違いない。それはサンゴ礁の専門家の目からなら、はっきりみえるのかもしれない。

だがサンゴ礁も、他の生態系と同じく、無数の生物の集まりであり、それらは互いに激しく競い合っているのが常態である。温度上昇や酸性化によってある生物が死ねば、他の生物は待ってましたとばかり、その隙を狙って繁栄する。

前述したように、サンゴによっては酸性化に強いものもある。筆者は、サンゴの種の交代は起きるにしても、サンゴ礁が丸ごと衰退するようなことはあまり起きないのではないかと考えている。

例えてみれば、サンゴ礁とは雑木林ないしはジャングルのようなものであろう。大気汚染があれば、それに弱い木は衰え枯れるが、そのチャンスに育つ木がある。専門家の目には変化がみえるが、多くの普通人にとっては、外観も利用価値もあまり変わらない。そして、大気汚染のひどい地域での地上の樹木に比べれば、海洋でのサンゴへのpH0.2の低下のストレスがそれほど大きいとは思えない。

だが極端な場合には、死滅するサンゴ礁もあるかもしれない。するとジャマイカや式根島海中温泉のように、サンゴ礁はなくなる。だがそれでも、豊かな藻場ができる。藻場はCO<sub>2</sub>の施肥効果によってかなりの恩恵を受けるだろう。これは魚類にとって、そして漁業にとっては、プラスの効果となるだろう。

IPCC AR5 WG1 は高めの値として、2100年までに今後3℃の温度上昇とpH値の0.2の低下を予測している。だがこの程度であれば、これまでの時間的・空間的な変動幅と比較して特段に大きいとも思えず、人間活動や生物の多様性に重大な悪影響を生じるとは筆者は思わない。

もちろん、海洋の環境および生態系のさらなる調査研究は必要である。そもそも、海洋のどこで、いつ、どのような温度・CO<sub>2</sub>濃度分布になっているか、そこでどのような生物および生態系が存在しているか、といった基本的なことからまだよくわかっていないからである。これを知ることは、単に温暖化や酸性化の環境影響評価に

留まるものではなく、水産養殖業の生産性向上や、漁業資源の保護のためにも有益であろう。

そして、サンゴ礁が被害を受けるリスクはある(何事にもゼロリスクはありえない)。問題は、それが温暖化対策としての排出削減のコストをどれほど正当化できるか、である。これについては、またの機会に譲る。

## 付 大事な余談——サンゴ礁と安全保障

島嶼国にとって、自然災害からの防災、港湾整備や、温暖化対策としての海面上昇への適応等を目的として、土木工事が有用なことは間違いない。だがこれは、安全保障と直結する物騒な話でもある。

中国が南沙諸島付近において、人工島を建設したり、環礁島を軍事基地化しているという報道が多くなされている<sup>\*35</sup>。これらの建設技術とは、温暖化対策のための土木工場の技術とほとんど重なる。

インド洋に浮かぶモルジブにおいても人工島の建設が進められていて、これはもともと人口過密地からの移住のためのものだったが、後から地球温暖化への適応という名目も付け加わっている<sup>\*36</sup>。

だがこの人工島の建設をどの程度素直に受け止めて良いのかは悩ましい。というのは、モルジブは中国の一路構想におけるインド洋の交通の要衝であり、モルジブ国内は親中国派と反中国派がせめぎあっている<sup>\*37</sup>。反中国派は中国からの投資・開発・債務によって国土が侵されつつあると訴えている<sup>\*38</sup>。執筆現在でモルジブは政争の中にあって、2月には非常事態宣言が出された。

今後もあらゆる島嶼国で温暖化対策を名目とした土木工事が進むことが予想される。それ自体は、自然災害への防災や、港湾・道路整備などの観点からももちろん望ましいことである。

しかし国際政治上で際立つのは、中国とそれへ対抗する諸国の海洋進出競争という構図である。日本も安全保障のため、島嶼国と友好関係を保ち、また基本的な価値を共有すべく、観光業・水産業・食品加工業等の開発に協力するなどの形で、大幅な投資拡大を行うのが望ましい。このための対話の入り口として、あるいは国内資源の動員のための課題として、温暖化問題を位置づけることは有益だろう。

\*1 杉山 2017 ワーキング・ペーパー (17-003J)「キリバスの地球温暖化への適応について」、キヤノングローバル戦略研究所

\*2 なお海面上昇についてもエルニーニョ等の影響があり地球全体で一様に上昇するわけではない。地球の多くの場所では過去20年間で海面水準は低下もしている。

\*3 IPCC 第五次評価第一一部会報告書 (AR5 WG1、以下同じ)。  
<http://www.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20WG1&f=SPM>

\*4 IPCC AR5 WG1

\*5 <http://www.cger.nies.go.jp/ja/news/2014/140516>

- html
- \*6 茅根 創, 2011, サンゴ礁と地球温暖化(日本サンゴ礁学会編、2002、サンゴ礁学:未知なる世界への招待、第10章)、東海大学出版会、P256
- \*7 サンゴ礁の未来について、楽観的な研究を紹介したものとして、端的でわかりやすいのは:  
<http://www.rationaloptimist.com/blog/the-blue-planet-on-acid/>  
 同じ楽観的な研究について、多くの論文を紹介するものとして:  
<https://www.thegwpf.org/content/uploads/2015/10/benefits1.pdf>
- \*8 サンゴ礁へのCO<sub>2</sub>の影響について、楽観論・悲観論をともに平易に紹介したものとして:  
<http://palaeo-kuroneko.blogspot.jp/2014/09/blog-post.html#more>
- \*9 [https://wired.jp/2017/12/11/mysteries-of-coral/?utm\\_source=push\\_note&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=push\\_wired\\_2](https://wired.jp/2017/12/11/mysteries-of-coral/?utm_source=push_note&utm_medium=referral&utm_campaign=push_wired_2)
- \*10 初期の実験室研究の問題点については下記リンクに論文集と詳しい説明がある  
[www.co2science.org/data/acidification/results.php](http://www.co2science.org/data/acidification/results.php)
- \*11 該当箇所はIPCC AR5 WG2 Fig SPM 6。2100年までほぼあり得ない851~2,900ppmのCO<sub>2</sub>濃度に対する悪影響の評価が提示されている。この問題点について詳しくは杉山大志「地球温暖化とのつきあい方」(ウエッジ)。
- \*12 IPCC AR5 WG2。これはかなり「環境影響警告調」で書いてある。なおこのIPCC報告は、科学的内容としては下記文献を中心にまとめている。この論文は酸性化の影響は生物の種類や状況によって多様であることに重きを置いた書き方になっている:  
 Kroeker et al (2013) Impacts of ocean acidification on marine organisms:  
 quantifying sensitivities and interaction with warming, *Global Change Biology* (2013) 19, 1884-1896, doi: 10.1111/gcb.12179
- \*13 酸性化に強いサンゴの存在については以下を参照:  
 Castillo KD et al. (2014) The reef-building coral *Siderastrea siderea* exhibits parabolic responses to ocean acidification and warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. DOI: 10.1098/rspb.2014.1856
- \*14 Hofmann GE, Smith JE, Johnson KS, Send U, Levin LA, et al. (2011) High-Frequency Dynamics of Ocean pH: A Multi-Ecosystem Comparison. *PLoS ONE* 6(12): e28983. doi:10.1371/journal.pone.0028983
- \*15 Camp, E. F., Nitschke, M. R., Rodolfo-Metalpa, R., Houlbreque, F., Gardner, S. G., Smith, D. J., ... Suggett, D. J. (2017). Reef-building corals thrive within hot-acidified and deoxygenated waters. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-02383-y>  
 紹介記事:  
<http://www.newsweek.com/super-corals-great-barrier-reef-climate-change-623535>  
<https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/106758>
- \*16 Shamberger, K. E. F., Cohen, A. L., Golbuu, Y., McCorkle, D. C., Lentz, S. J., & Barkley, H. C. (2014). Diverse coral communities in naturally acidified waters of a Western Pacific reef. *Geophysical Research Letters*, 41, 1-6. <https://doi.org/10.1002/2013GL058489>. Received
- \*17 国立環境研究所地球環境研究センター  
[http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/18/18-1/qa\\_18-1-j.html](http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/18/18-1/qa_18-1-j.html)
- \*18 "it is questionable if marine functional diversity is impacted significantly along the ranges of acidification predicted for the 21st century. Active biological processes and small-scale temporal and spatial variability in ocean pH may render marine biota far more resistant to ocean acidification than hitherto believed."  
 Hendriks IE, Duarte CM and Alvarez M (2010). Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: a meta-analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 86: 157-164.
- \*19 酒井一彦, 2011, サンゴ礁生物の変遷(日本サンゴ礁学会編、2002、サンゴ礁学:未知なる世界への招待、第11章)、東海大学出版会、P263
- \*20 火山等の影響によりCO<sub>2</sub>が多い海域の生態系の調査は世界各地で実施されつつある。  
<http://palaeo-kuroneko.blogspot.jp/2016/01/blog-post.html#more>
- \*21 IPCC AR5 WG1 Fig 5-2
- \*22 PETMについてのわかりやすい説明として: ステージャ 2012 「10万年の未来地球史」、日経BP社
- \*23 Gutjahr, M., Ridgwell, A., Sexton, P. F., Anagnostou, E., Pearson, P. N., Pälike, H., ... Foster, G. L. (2017). Very large release of mostly volcanic carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature*, 548(7669), 573-577.  
<https://doi.org/10.1038/nature23646>
- \*24 IPCC AR5 WG1 Figure 5.3  
<http://www.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20WG1&f=Chapter%2005>  
 なおこの温度変化は平滑化をしている(ローパスフィルタをかけている)ので実際の温度変化はもっと大きかったと思われる。
- \*25 McCulloch, M. T., Tudhope, A. W., Esat, T. M., Mortimer, G. E., Chappell, J., Pillans, B., ... Omura, A. (1999). Coral record of equatorial sea-surface temperatures during the penultimate deglaciation at Huon Peninsula. *Science*, 283(5399), 202-204.  
<https://doi.org/10.1126/science.283.5399.202>
- \*26 Herbert, T. D., Peterson, L. C., Lawrence, K. T., & Liu, Z. (2010). Tropical Ocean Temperatures Over the Past 3.5 Million Years, 328 (June), 1530-1535.  
<https://doi.org/10.1126/science.1185435>
- \*27 McCulloch, M. T., Tudhope, A. W., Esat, T. M., Mortimer, G. E., Chappell, J., Pillans, B., ... Omura, A. (1999). Coral record of equatorial sea-surface temperatures during the penultimate deglaciation at Huon Peninsula. *Science*, 283(5399), 202-204.  
<https://doi.org/10.1126/science.283.5399.202>
- \*28 Thomas 2013  
<https://www.nature.com/news/the-anthropocene-could-raise-biological-diversity-1.13863>  
 紹介記事 <http://www.nytimes.com/2011/04/03/opinion/03Raffles.html>
- \*29 Brown, J. H. (2014). Why are there so many species in the tropics? *Journal of Biogeography*, 41(1), 8-22.  
<https://doi.org/10.1111/jbi.12228>
- \*30 原論文は、  
<https://www.nature.com/articles/nclimate3004>  
 わかりやすい紹介記事としては、  
<https://www.thegwpf.org/matt-ridley-global-warming-versus-global-greening/>
- \*31 ビルにおける換気の管理ではCO<sub>2</sub>濃度を1,000ppm以下にしている。これは1,000ppmが有害であるというのではなく、屋内に人が多く、匂いがたまること等の指標としてCO<sub>2</sub>が使われている。
- \*32 [https://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/pub2016\\_or\\_later/files/nivfs\\_report01-5\\_1.pdf](https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/pub2016_or_later/files/nivfs_report01-5_1.pdf)
- \*33 IPCC AR5 WG2 6.1.2.2. p422
- \*34 <http://palaeo-kuroneko.blogspot.jp/2014/09/blog-post.html#more>
- \*35 [https://www.jiji.com/jc/d4?p=um622-jpp021852003&d=d4\\_tt](https://www.jiji.com/jc/d4?p=um622-jpp021852003&d=d4_tt)
- \*36 <https://www.asahi.com/articles/ASL3P41D1TL3PULBJ002.html>
- \*37 [https://www.newsweekjapan.jp/mutsuji/2018/02/post-10\\_1.php](https://www.newsweekjapan.jp/mutsuji/2018/02/post-10_1.php)
- \*38 <http://www.afpbb.com/articles/-/3159522>