



CORAL IN A WARMING WORLD
CAUSES FOR OPTIMISM
Peter Ridd

**温暖化に適応するサンゴ礁
－楽観論の理由について－**

ピーター・リッド

監訳 杉山大志 訳 木村史子

The Global Warming Policy Foundation
Report 55

温暖化に適応するサンゴ礁ー将来を楽観できる理由ー

ピーター・リッド

監訳 キヤノングローバル戦略研究所研究主幹 杉山大志 訳 木村史子

本稿は、Peter Ridd, Coral in a Warming World: Causes for Optimism Report 55, <https://www.thegwpf.org/content/uploads/2023/02/Ridd-State-of-Coral-Reefs.pdf> を、The Global Warming Policy Foundation の許可を得て翻訳したものである。

目次

著者について.....	2
謝辞.....	3
本論に対する反対意見について.....	3
概要.....	3
1. はじめに.....	4
2. 世界のサンゴ礁におけるサンゴの生息数.....	8
3. 調査結果.....	14
4. サンゴと「温水」条件下での白化現象.....	29
5. 総括と結論.....	35
参考文献：.....	39

著者について

ピーター・リッド：物理学者。1984年からグレートバリアリーフを調査し、100以上の科学論文を発表している。オーストラリアのタウンズビルにあるジェームズクック大学の海洋地球物理学研究所の元所長で、2018年にサンゴ礁に関する研究機関の品質保証の欠陥を指摘し、解雇された。現在は無報酬で科学の品質保証問題に取り組んでいる。パブリック・アフェアーズ研究所 (Institute of Public Affairs) の非常勤フェロー、地球温暖化政策財団 (Global Warming Policy Foundation) のアカデミック・アドバイザー・カウンシルのメンバー。

謝辞

原稿の推敲を手伝ってくれた D. メイソン・ジョーンズ、A. ジョーンズ、E. リッド、M. リッド、A. モンフォード、そして情報の提供やサポートしてくれた多くの人々に感謝したい。2人の査読者が原稿を大幅に改善してくれたことにも感謝する。尚、著者はジェームズ・クック大学を解雇されて以来、いかなる組織や個人からも無報酬で働いており、利益相反はないことを宣言している。

本論に対する反対意見について

GWPFの方針に従い、GWPFは本論文の結論に反対すると思われる著者からの回答を求めた。連絡を取った著者のうち、この招待に応じた者はいなかった。

概要

サンゴのデータ

・長期で大規模なサンゴ被度について最も信頼できるデータは、グレートバリアリーフのものである。サンゴの被度は年によって大きく異なるが、2022年1985年に記録を開始して以来最高の値となり、2011年の2倍だった。

・グレートバリアリーフの3000のサンゴ礁のうち、失われたサンゴ礁はひとつもなく、どのサンゴ礁も素晴らしいサンゴが生育している。年によってサンゴの被度は大きく変動するが、そのほとんどはサイクロンとオニヒトデによる捕食の結果である。

・世界の他の地域のデータは信頼性が低く、有効なデータは過去20年間のみである。

・全世界で集計しても、サンゴの被度が大幅に減少していることを裏付けるデータはない。最悪の見積もりでは、2000年から19年の間に7%の減少があったかもしれないとされるが、その差と同程度の誤差があると言われている。さらにデータの自然変動性も10%程度であり、2000年と2019年のサンゴ被度の減少率の差よりも大きい。

・世界のサンゴ礁の30%を占め、特に多様性に富む「サンゴトライアングル」を含む東アジア海域のサンゴ生物圏のデータは、記録開始以来、統計的に目立ったサンゴの純減はないことを示している。

・オーストラリア以外の地域では、データセットの標準化とランダム化を改善する必要がある。

サンゴの白化現象

・高水温によるサンゴの白化に関する最も包括的なデータは、グレートバリアリーフのデータである。そのデータからわかることは、全体的な影響は非常に小さいことである。2022年までの6年間に、壊滅的と主張された白化現象が4回発生したにもかかわらず、現在のサンゴ被度は過去最高を記録している。

・サンゴは通常、大きな死滅現象から再生するまでに少なくとも5~10年かかる。2022年にサンゴが記録的な高水準に達したことは、サンゴの大量死に関する報道が誤りであったことを示唆している。このことは、科学機関やメディアの信憑性に重大な疑問を投げかけるものである。

・サンゴの白化現象は、サンゴの体内に共生していた藻類（褐虫藻）を排出することで起こる。それはしばしば、回復するときに別の種類の藻類と置き換わる。このプロセスにより、サンゴは気温の変化に非常に適応しやすくなる。

・ほとんどのサンゴは白化しても死滅しない。

結論としては、世界のサンゴ礁の将来は、少なくとも気候的な温度変化の影響については、一般に考えられているよりもはるかに楽観視できる。サンゴの永久的な大損失に関する多くの主張は、かなり誇張されていることは今や明らかだ。悲観的な集団思考がサンゴ礁に関する情報の大部分を支配している可能性が高い。そして、そのような考え方が、世界のサンゴ礁を観察する際の正確性に影響を及ぼしている。

1. はじめに

サンゴ礁の生態系は、人為的な気候変動の影響を特に受けやすいとよく言われており¹、ここ数十年で大きなダメージを受けているとされる²。サンゴ礁生態系は「炭鉱のカナリア」とも言われ³、気候に関する議論の最前線となっている。2018年、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は次のように述べている。

「例えば、サンゴ礁は、1.5°Cの気温上昇の場合（高い信頼度で）さらに70~90%減少し、2°Cの場合（非常に高い信頼度で）さらに大きな減少（99%以上）が予測される⁴。」

本稿は大きく3つのセクションで構成されている。セクション2と3では、世界のサンゴ礁の状況に関するデータを検証し、サンゴ礁の現状が一般に言われているような悲惨なものであるかどうかを判断する。また、高水温による「白化現象」によってどれだけのサ

ンゴが失われたかというデータも検証している。セクション4では、サンゴの内部に共生する藻類を変化させることで、気温上昇に適応するサンゴの驚くべき能力について解説する。ここ数十年の研究により、サンゴの白化は驚くべき適応メカニズムの一部であり、サンゴは気温上昇の影響を最も受けにくい生物のひとつである可能性があることが示されている。

尚、ここでは、サンゴ礁が直面している気候変動以外の多くの脅威、特に保護や適切な管理がほとんど行われていない世界のサンゴ礁の脅威については詳しく触れない。これらの脅威には、乱獲、外来種侵入、汚染が含まれる。

サンゴとサンゴ礁

データを深く掘り下げる前に、サンゴの生態を考えてみる必要がある。ハードコーラルのコロニーは、数千から数百万のポリープで構成されている。ポリープは、数ミリから1センチの小さな動物である。コロニーの大きさは、数センチから数メートルにもなる（図1）。ハードコーラルのポリープ（図1a）は、コンクリートのように硬い炭酸カルシウムで壺状の住処を作る動物だ。そして樹木のような植物とは異なり、サンゴの骨格は腐敗しないため、死後何百万年も存在し続けることができる。



(a)



(b)



(c)



(d)

図1：サンゴ

(a) 個々のサンゴのポリープ。

(b) サンゴには無数の形と大きさがある。

成長が早く、デリケートな「プレート」サンゴや「スタッグホーン」サンゴは、嵐やオニヒトデの大発生によるダメージを非常に受けやすい。また、高温による白化にも最も弱い。

(c) 造礁サンゴの一例。成長が遅いが、何世紀も生き続けることができる。比較的白化の影響を受けにくい。

(d) このボミー（サンゴの露頭）」の上のサンゴの被度は 100%。左下の水深の深いところでは、サンゴの被度は 50% (0.5) よりかなり低く、かなり死んだサンゴと砂がある。

死んだサンゴの骨格は時間とともに積み重なり、「サンゴ礁」を形成し、それはしばしば海底から 100 メートルの高さ、水面までそびえ立つ（図 2）。サンゴ礁⁵は、言わばサンゴの死骸の山の上に生きているサンゴの薄いベニヤ板が乗っかっている状態なのである。つまり、サンゴは通常サンゴの墓場で成長するのである。

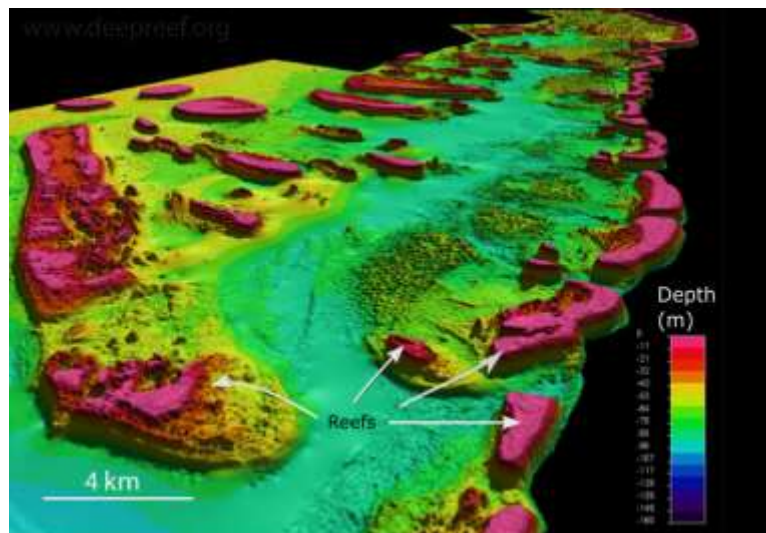


図 2：サンゴ礁の構造

サンゴ礁は、サンゴの瓦礫の山や、固まったサンゴの厚い岩床の上に、生きたサンゴの薄いベニヤ板が乗っている状態。グレートバリアリーフのサンゴ礁は、比較的平らな大陸棚の上にある高さ 50~100 メートルの平らな海底の丘である。サンゴ礁が海面まで成長するには、サンゴの死滅が続く必要がある。（出典：R.Beaman、deepreef.org）

サンゴはさまざまな気候で育つが、温帯海域よりも熱帯海域においてはるかに多く生息している。インドネシア、パプアニューギニア、フィリピンの周辺海域にある「コーラル・トライアングル」⁶と呼ばれるサンゴの多様性が最も高い海域は、地球上で最も高温の大水域であるインド太平洋ウォームプールの中心に位置している。これは決して偶然では

ない。サンゴの成長率は水温が1°C下がるごとに、およそ15%低下するからだ⁷。

サンゴはアラスカのような冷たい海にも生息しているが、これらの海域でのサンゴの成長速度は非常に遅く、サンゴ礁を形成することはできない。

2. 世界のサンゴ礁におけるサンゴの生息数

気候変動が原因で世界のどこかでサンゴが失われた、といった類の大きな報道がない月はほとんどないくらいだ。例えば、GBR（グレートバリアリーフ）では、1995年以降、サンゴの半分が失われ⁸、2009年以降、世界のサンゴの14%が失われたと報道されている⁹。

本稿では、サンゴ礁の現状を把握するために、利用可能なデータを基に考察する。次の2つのデータセットを取り上げる：

- ・ オーストラリア海洋科学研究所のGBRの長期モニタリングプログラム
- ・ 地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク（GCRMN）の世界各地のデータ

サンゴ礁の状態に関するデータ収集は数十年前に始まったばかりで、現在でも比較的まばらなため、この情報を使ってサンゴ礁のサンゴの量の長期的な軌跡を決定することは、困難である。気象観測のような100年単位の記録もない。それでも、世界のサンゴ礁の約13%を占めるGBRは、大規模なサンゴ礁システムとしては最も信頼性が高く、長い記録（37年間）を持っている。一方GCRMNのデータは、それ以前のデータ収集が不十分であったため、一般的には1990年代末以降のものしか利用できない。

海洋国立公園内に膨大な量のサンゴを持ち、1970年代以降、それらをモニターし保護してきたオーストラリアとは異なり、他のほとんどの国ではサンゴの量ははるかに少なく、1990年代末までモニタリングはほとんど行われていなかった。現在でも、GCRMNによるモニタリングは散発的で、サンプリング方法も一貫していない。

このレポートでは、記録されたサンゴ（ハードコーラル）の量の変化を中心に報告する。ただ、サンゴ礁には他にも多くの生物が生息している。ソフトコーラルや、壊れたサンゴをつなぎ合わせる「セメント」である甲殻類サンゴ藻類を含む藻類である。サンゴ礁には、砂や堆積物がむき出しになっている部分が多く必ずしもサンゴ礁の100%がサンゴ（ハードコーラル）で覆われているとは限らない。一方で世界的な気温上昇の影響に関するサンゴに関する主な懸念は、サンゴの量が減少し、藻類など他の種類の生物に取って代わられていないかどうかということである¹⁰。

サンゴ礁の大部分は水中にあるため、長期的な状態の変化を判断することは困難であり、過去の航空写真のアーカイブを使用することはできない¹¹。これは、熱帯雨林の皆伐が約1世紀にわたって記録されている、世界の熱帯雨林の衰退に関するモニタリングとは対照的である。アフリカ、アジア、南米における熱帯雨林の面積の減少は、古地図や航空写真から容易に推測することができる。また、例えば、Google Earthの画像を利用すれば、ヨーロッパ人が入植して農業による伐採を行って以来、オーストラリアの熱帯雨林は50%減少し、低地の熱帯雨林はほぼ完全に失われたことが推測できる。かつて熱帯雨林があったはずの場所には、現在農場がある。しかしGBRに関しては、農業のための皆伐に匹敵するような物理的なサンゴ礁の破壊は起きていないとしか言いようがない。GBRにある3000のサンゴ礁はすべて現存し、そのすべてにサンゴが生息しているのである。

港や空港の開発、セメントの採石など、世界各地でサンゴ礁の物理的な破壊が起きている。このことは、衛星から簡単に観察することができる。中国が最近、南シナ海の軍事基地のために岩礁の頂部全体を破壊したのは、その明らかな例である¹²。しかし一般的に、サンゴ礁の変化は、陸上で起きた大規模な環境破壊に比べるとはるかに小さなものである。さらに、サンゴ礁はサンゴやその他の生物の量にかなりのばらつきがあることが多く、ある時期と別の時期のサンゴ礁を比較することは、長期的な傾向を判断する上で必ずしも有益ではない。このように、サンゴ礁のサンゴ被度の変化を調べるには、長期間に渡る非常に微妙な変化を調べる必要がある。例えば、サンゴ礁のサンゴが減って、サンゴ藻や大型藻類など他の種が本当に増えているかどうか調べる必要がある。

サンゴ礁のモニタリングは容易ではない

現在でも、サンゴ礁の状態のモニタリングはかなり限られている。その理由は、広範囲をカバーしなければならないこと、膨大なコストがかかることである。サンゴ礁生態系のごく一部をモニターするだけでも、多くのダイバーが必要であり、非常に労力を要する。

マンタ・トウ (Manta-tow) 法 (図3) を使って、サンゴ礁の広い範囲を調査することができる。これは、目視調査の一種で、小型ボートに牽引されたダイバーが、約100メートルにわたってサンゴの被度、種類、状態を推定するもので、非常に広い範囲のサンゴの総量を素早く (大雑把に) 推定する。ダイバーは訓練を受けているが、これらの推定にはある程度の主観が入る¹³。それぞれのサンゴ礁の周囲は何キロメートルもあるため、1つのサンゴ礁につき、だいたい50から100の個々の推計値が存在する。



図3：マンタ・トウ (Manta-tow) 法

マンタ・トウ (Manta-tow) 法でサンゴ礁を調査するオーストラリア海洋科学研究所の科学者。(画像提供：AIMS)。

サンゴ礁のトランセクト (調査する区画) を短くすることで、より正確なサンプリングが可能になる。1メートルごとに写真を撮る底生生物調査を使えば、はるかにゆっくりと時間をかけて、より正確にサンプリングすることができる。この調査によって、非常に狭い範囲 (一般的に 100m 以下) についての詳細な画像が得られる。

サンゴ礁システムをモニタリングする作業の規模の大きさと困難さを理解するためには、世界で最も包括的なモニタリング・プログラムが実施されている GBR のデータが好例である。オーストラリア海洋科学研究所 (AIMS) が実施している「長期モニタリング・プログラム」(LTMP) は、1980 年代半ばに始まったばかりで、それ以前の期間については散発的なデータが存在するが、長期的な傾向を判断するにはあまりにもデータが限られている。なにせ GBR は巨大で、ドイツよりも大きく、カリフォルニアと同じくらいの長さがある。そして 3000 ものサンゴ礁があり、それぞれが数キロメートルの大きさなのである。AIMS は、毎年およそ 100 の岩礁をマンタ・トウ (Manta-tow) 法で調査している。つまり、毎年およそ 1000km を調査していることになる。これだけの距離を調査しているにもかかわらず、その面積は海洋国立公園の総面積の 0.003% にすぎない。さらに AIMS は、底生生物調査の方法で約 100 の小さなトランセクトも調査している。

このように AIMS の LTMP から得られるデータは、人手によるサンゴ礁のモニタリングの難しさによって大きく制限されている。現在、人工知能を使った手法や水中ドローンの開発が進められており、これらによって、はるかに費用対効果の高い、包括的な調査が可能になると期待されている。しかし、実現はまだ未来の話である。

サンゴ礁のモニタリングには、規模やコストの制約があることに加え、メディアや科学

的な報道でよく見られるもう1つの問題は、次のようなものである。

- ・データが得られる期間が短いこと
- ・データの不確かさ
- ・データ収集にさまざまな方法が使われていること。

これらの要素はすべて、データセットの解釈にとって非常に重要である。データの多くは不確実性が高いので、サンゴのわずかな変動についてはこれだけでは解決できない。さらに、自然の変動性も考慮しなければならない。後述するように、サンゴ礁は死滅と再生の大きなサイクルを完全に自然のこととして繰り返している。サンゴが周期的に大きく「失われる」のは正常なことかもしれない。再生に失敗した場合のみ、本当に問題となるのだ。

データソース、その質及び信頼性

サンゴ礁の調査では、通常「サンゴ被度」、つまりサンゴ礁の海底が硬いサンゴで覆われている割合を測定する。サンゴ被度という単位で、1.0はハードコーラルに完全に覆われていることを表し、0はサンゴが全くないことを意味する。

本稿とは異なり、多くの科学的な文献ではサンゴ被度はパーセントで表示されることが多く、100%が完全に覆われていることを示す。パーセンテージの使用は主にメディアで使われる際、かえって混乱を招いている。つまりサンゴの被度変化をパーセンテージで報告しているため、絶対的な変化なのか、相対的な変化なのかを判断するのが難しくなっているのだ。例えば、サンゴの被度が10%から15%に変化した場合、絶対的な変化は5% ($15-10=5$)、相対的な変化は50% ($(15-10)/10 \times 100=50\%$)となる。正規化した場合では、この例は0.1から0.15への変化となり、絶対的な増加は0.05、相対的な増加は50%となる。したがって、今回のアプローチだと、パーセントそのものの数値の割合変化を考えないで済む。

データソース1：GCMRN（地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク）

GCMRN（地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク）は、世界中のサンゴ礁の状態をモニタリングする科学者、管理者、団体を取りまとめ、世界10カ所の拠点を通じて活動している。2020年版報告書には、世界のサンゴ礁に関するデータ¹⁴、主なものとしてサンゴの被度について、またそのみならず分類群や水深に関するデータも掲載されている。サンゴは主に水深約40mまでの光が届く海の最上層「有光層」に生息している。そしてほとんど研究されていない深海の「深海層」のサンゴについてはデータに含まれていな

い¹⁵。多くのサンゴ礁では、サンゴが有光層全体に豊富に生息しているにもかかわらず、ここでのデータでは水深約 10m 未満に生息するサンゴのみを対象にしている。このようにデータが水深が浅い海域に偏っているのは、水深の深い海域の観測にかかるコストと困難さが非常に大きいためである。また、このこと自体が、現在のところ、サンゴの被度に関するデータが極めて限られていることを示している。

GCRMN は、世界を 10 の主要地域に分け、それぞれについて標準化した報告書を作成し、さらに世界全体の報告についてもまとめている。それによると、サンゴ礁の 83%¹⁶ は、10 地域のうち、わずか 4 つの地域で占められている。それは、東アジア (30%)、太平洋 (27%)、オーストラリア (16%) とカリブ海 (10%) である。ここでは 10 地域すべてのデータを示すが、説明を簡潔にするため、サンゴが最も多く生息している 4 つの地域について、より詳しく解説したいと思う。

GCRMN のデータの質と方法は非常にばらつきがある。その大部分は、多くの科学組織と政府管轄区域からの情報提供を受けていることに起因している。水中のモニタリングの難しさとコストを考えれば、このばらつきも理解できる。

東アジアとオーストラリアのデータ収集方法の違いは興味深い。東アジアでは、GCRMN データの中で、15 年以上のデータを持つサイトはわずか 5%、10 年以上のデータを持つサイトは 12% 以下の割合である。75% 以上のサイトが単年度のデータしか持っていないのである。対照的に、オーストラリアの底生生物調査では、35% 以上の地点で 15 年以上のデータがあり、60% の地点で 15 年以上のデータが存在している。とはいえ、GCRMN によって報告されているオーストラリアの底生生物データでさえ、1990 年代中頃に開始されたばかりであり、データの歴史的価値は限定的であるといえる。GCRMN においては、報告されている底生生物調査のおよそ 50~100 倍の面積をカバーしている GBR のマンタ・トウ (Manta-tow) 法調査データは含まれていない (次のセクションを参照されたい)。東アジア地域の底生生物調査の主な方法論は「目視による調査」(データの 65%) である。GCRMN の報告書には記載されていないが、訓練を受けた専門家による推定と思われる。これは、GBR で実施されたマンタ・トウ (Manta-tow) 法調査とほぼ同じである。しかし、GCRMN は、GBR については底生生物調査データのみを含めることを選択した。それ以外の海域については、マンタ・トウよりも詳細な方法を用いている調査データは約 25% 程度しかないのにも関わらず、である。したがって、GCRMN のデータで使われている手法には矛盾がある。

データソース 2：LTMP（長期モニタリング・プログラム）

GCRMN データ以外に、本稿では GBR の AIMS（オーストラリア海洋科学研究所）による LTMP（長期モニタリング・プログラム）のデータを検討したい。というのも GBR は、単一のサンゴ礁系としては圧倒的に規模が大きく、気候変動によって大きなダメージを受けているとして、政治的な議論でも定期的に引き合いに出されており、サンゴ礁の将来に関する議論の中でも特別な位置を占めているからである¹⁷。GBR の長期モニタリングは、オニヒトデが大量に発生しサンゴを大量に食べているという深刻な懸念から、1985 年に開始された。特にメディアでは、GBR 全体が完全に失われる可能性が高いと予測されていた¹⁸。気候に対する懸念が広まるはるか以前のことであり、これが GBR に対する「警鐘」の先駆けとなった。

前述したように、このデータセットには 2 つの主要な要素がある：写真による底生生物調査とマンタ・トウ法（目視）による調査である。本セクションではマンタ・トウ（Manta-tow）法のデータを取り上げる。これは最も古く、方法論にもっとも一貫性がある。

データの限界、不確実性、誤差

サンゴの被度の変化は、微妙で局所的なことが多い。そのためどの程度の変化であれば意味があるのかを考えることが重要である。一般的に、サンゴの被度測定の不確かさは非常に高い。AIMS では、個々のサンゴ礁の調査の不確かさを約 0.10～0.19 としている¹⁹。GCRMN の底生生物調査においては、この数値はさらに高くなることが多い。ただし、誤差の分布がランダムである、つまり誤差の分布が q-ガウス分布²⁰であると仮定できる場合に限られる。その結果、およそ 100 のサンゴ礁のサンゴ被度の平均を考慮した場合、一般的な不確かさの幅はおよそ 0.04 となる^{21,22}。2 年間の差の誤差は 0.08 となり、0.08 未満の差は有意な差とはみなされない。このため約 0.08 を超えない限り、2 年間のデータは実質的に同等である。

しかし、より大きなデータセットを平均化しても、誤差がランダムでない場合には、不確実性の低減には役立たない。このような系統的誤差の原因のひとつは、上述したように、GCRMN が地域ごとに使用している手法に一貫性がないことにある。調査方法はサンゴが豊富な地域のデータの多くは、サンゴの種類によってバラバラでその場しのぎなのである。GCRMN は、2000 年以前の世界の集計データについて、最大 25% の不確実性の幅を推定している。だが、これはおそらく過小評価である。GBR の LTMP データとは異なり、2000 年以前の GCRMN データのほとんどすべて、そしてそれ以降の期間についても

かなりの割合が、長期的な傾向を見るという明確な意図のもとに収集されたものではない。そのため、多くの地域では年ごとに調査方法が異なっている。ほとんどの地域では、2000年頃を境にデータの収集量が約10倍に増えているため、その前後でサンプリング地点を無作為にするなどの工夫をしないと、サンゴの被度平均に偽りが生じる。つまりサンゴ礁の場所によって、サンゴの量に大きな違いがあり、ほとんどない場所もあれば、100%サンゴに覆われている場所もある。2000年以前は、ほとんどの地域²³で慎重な無作為化が行われていなかったことは確かなようだ。GCRMNの報告によると、データの非ランダム化による不確実性は30%にもなる²⁴。しかしこの数字はグラフの不確実性の推定値には反映されていない。

政治的世論調査における類例を考えることは有益である。「社会主義は良いことだと思いますか?」という質問に対する世論調査の経年変化を考えてみよう。2000年まで、この世論調査は左派の有権者だけに行われたと仮定しよう。2000年以降、毎年10倍以上の世論調査が行われるようになり、世論調査のほとんどは、2000年以前には調査が行われなかった多くの中道・右翼の投票地域を含む、国内の他の地域で行われるようになったとする。2000年以降、社会主義への支持は明らかに劇的に低下した。しかし、これは意見の真の反映ではないかもしれない。2000年以前はサンプリングに偏りがあった。なので結果の解釈にはかなりの注意が必要だろう。GCRMNのデータの多くにも同様の状況がある。サンプリングが無作為化されていないことの最大の問題は、不確実性の推定がほとんど不可能なことである。GCRMNは、サンプルがどのようにランダム化されたかについて完全な分析を公表し、どのような失敗がどの程度不確実性の幅を広げているのかを明らかにする必要がある。

3. 調査結果

GBR (グレートバリアリーフ) の LTMP (長期モニタリング・プログラム) データ

まず GBR の LTMP のデータについて検討する。というのも、1980 年代半ばの開始以来、同じ手法を使用してきたデータだからである。また、入手可能な中で最も長い期間にわたるデータを保有しており、しかも個別に集計された数値も入手可能である。そのため、サンゴ礁の時間的変化を、個々のものから GBR 全体まで含めた生態系のデータを検証することができる。この時間的変化に関する情報は、あとで GCRMN (地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク) のデータを検討する際に役立つはずである。

2022 年、LTMP は、GBR のサンゴ被度が過去最高を記録したことを明らかにした (図 4)。(即ち、モニターされたサンゴ礁の海底の 34% がサンゴで覆われているということで

ある)²⁵。過去 36 年間、サンゴの被度は大きく変化し、2011 年には 0.12 ± 0.03 と最低値を記録した。そして 2022 年の GBR のサンゴの被度は、2011 年の約 2 倍²⁶である。2016 年から 2022 年の間に 4 回の白化現象が発生したにもかかわらず、2016 年以降、サンゴ被度は急速に増加しているのである。4 回の白化現象では大量のサンゴが死滅したと報告されている²⁷。しかし、図 4 のデータから、これらの白化現象がサンゴに与えた実際の影響は、非常に限定的であったことがわかる。科学機関やメディアが取り上げることはほとんどない²⁸が白化したサンゴのほとんどは死んではいないということを忘れてはならない。中には、ほとんどすべての生体組織を失っても、藻に覆われた死サンゴの骨格が再生し、12 カ月以内にサンゴの被度が回復するものもある²⁹。GBR では 1998 年と 2002 年に大規模な白化現象が起こったが、図 4³⁰からわかるように、どちらもサンゴの大幅な損失とはならなかった。最も低水準だった 2011 年は、2 つの大型サイクロン・ハリケーンとオニヒトデの同時発生が GBR のサンゴ礁の大部分に影響を与えた後であった³¹。

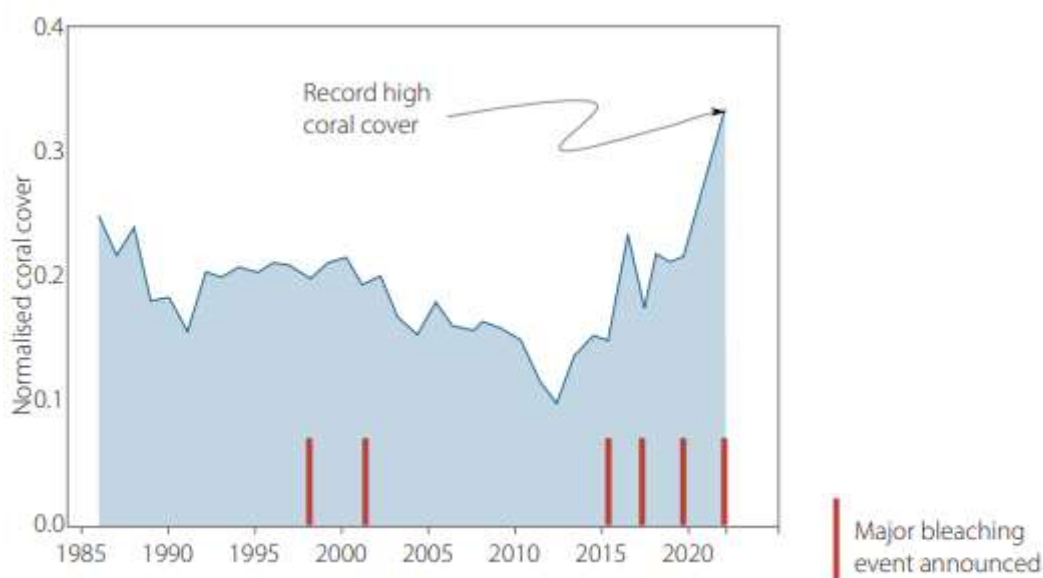


図 4：グレートバリアリーフのサンゴ被度。赤い線は大規模な白化の発生の宣言

AIMS（オーストラリア海洋科学研究所）の長期モニタリングプログラムによる測定値。サンゴは成長が遅い生物である³²。このグラフは、白化によってサンゴが大量に失われたと主張する機関は著しく誇張して述べていることの証明となっている。

不確実性の幅は ~ 0.04 。

GBR のデータを 3 つの主要な地域（北部、中部、南部：図 5 参照）に分けると、サンゴの被度は時間的にも空間的にも大きく異なることがわかる。

- ・北部地域は、2016 年頃に大きな落ち込みを経験した。原因は 2 つの激しいサイクロン、

そして進行中のオニヒトデの大発生による深刻なサンゴの白化であった³²。

しかし、その後サンゴは完全に回復し、現在ではサンゴの被度は2016年の2倍になり、以前の記録に並ぶまでになっている。

・中部地域もまた、記録的なサンゴの多さを記録しているが、より大きな変動も経験している。

・南部地域は、2009年の熱帯性サイクロン「ヘイミッシュ」(Hamish)³³によって深刻な影響を受けたが、現在では最高記録並みのサンゴの被度³⁴となっており、2011年の最低時期の3倍に達している³⁴。

興味深いのは、不確かさの値(青い帯)を考慮すると、どの地域も過去最高に匹敵する水準のサンゴ被度を記録していることだ³⁵。メディアでよく報じられているように、北部でも中部でも、極端な記録破りの高水準³⁶にあるという訳ではない³⁷。しかし、変動が大きいサンゴが、3つの地域すべてで同時に高いサンゴ被度となっているのは異例である。このように、3つの地域のいずれでも、極端な新記録こそ出ていないものの、サンゴ礁全体の被度については、少しではあるが過去最高を更新している(図4)³⁸。

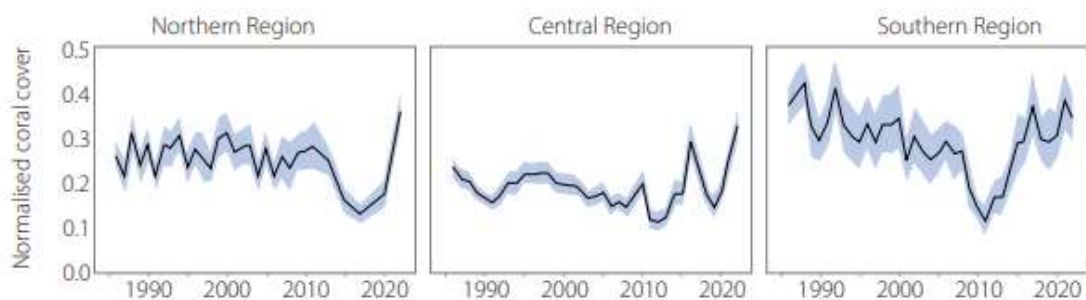


図5：1985～2022年のグレートバリアリーフ主要地域のサンゴ被度

AIMS長期モニタリングプログラムによる測定値。AIMS原本より抜粋。青い青色の網掛けは不確か性の幅を表す。

サンゴ被度の時間的変動が大きいことを示すために、GBRの3つの地域を更に11に分けたサブセクターの一つである、南部に位置するカプリコーン・バンカー諸島を検討してみよう(図6)。2022年、その地域のサンゴ被度は 0.59 ± 0.06 と過去最高を記録し、2011年の最低値 0.16 ± 0.03 の約4倍となった。

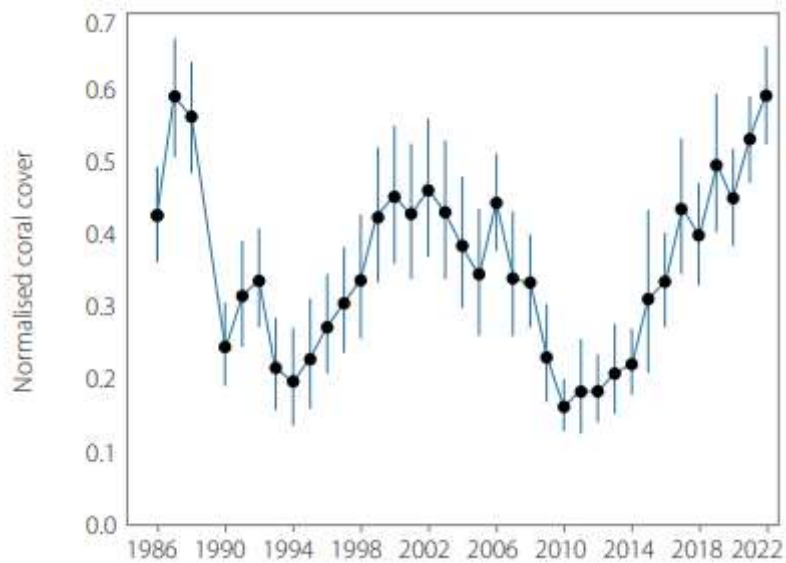


図6：カプリコーンバンカー諸島のサンゴ被度

AIMS 長期モニタリングプログラム (LTMP) による測定値。AIMS 原本より抜粋。青い棒は不確実性の幅を表す。

このセクターは1985年以来、二度にわたって激減と回復を繰り返してきた。今後も再び激減することがあるであろう。1993年や2010年のデータを見ると、この地域は悲惨な状態になっていた、という誤った解釈をもたらしたかもしれない。だがLTMPデータの最も重要な成果は、サンゴ礁の自然変動をより正確に把握できるようになったことである。サンゴの被度の変動は、繰り返し起こる大災害ではなく、多くのサンゴ礁の生命サイクルの一部であることを示しているのである。

時間的変動は、サンプリングしたサンゴの面積が小さいほど大きくなる。特に変動が大きいサンゴ礁はヘリックス礁³⁹で、その大きさは約1キロメートル四方である。サンゴの被度は、オニヒトデの大発生により、1986年には 0.04 ± 0.02 まで落ち込んだが、1998年と2002年に2回の白化現象が起きたにもかかわらず、2003年までにほぼ10倍の0.4まで回復した(図7)。その後、オニヒトデとサイクロンの複合的な影響により、2012年にはサンゴの被度は0.07まで再び減少したが、2016年以降、GBRで4回の白化現象が発生したにもかかわらず、 0.50 ± 0.08 という記録的な高水準⁴⁰まで再び回復している。

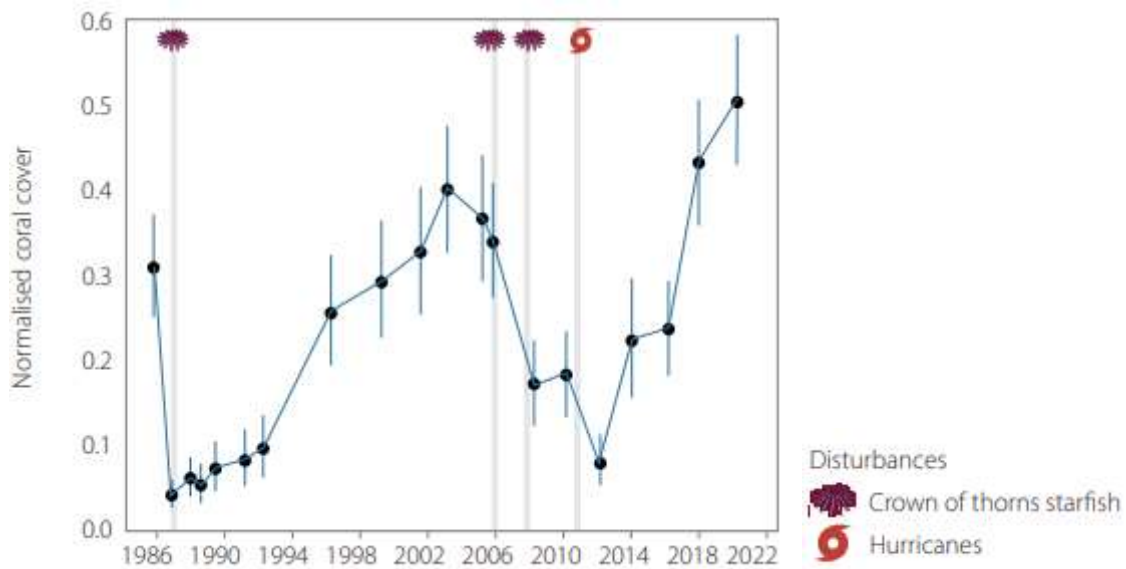


図7：ヘリックス礁のサンゴ被度

AIMS 長期モニタリングプログラムによる測定値。AIMS 原本より抜粋。青い棒は不確実性の幅を表す。サンゴの被度は、低い地点と高い地点で 10 倍程度変動している。赤い印はオニヒトデとハリケーンの発生を示す。

上記の分析から、サンゴの被度は時間によって劇的に変化することが明らかであろう。現在、GBR 全体ではサンゴの被度は記録的な高さを示しているが、将来的には減少することが予想される。サンゴ礁のデータがほとんどなかった数十年前には、このようなサンゴ礁の減少は非常に心配されたが、今ではそのような心配は無用である。なぜならば多くのサンゴ礁では、このような現象は生命の営みの一部だからである。回復不可能でない限り、それは「災害」ではない。そして、GBR では常にしっかりと回復が見られてきたのである。

世界各地の GCRMN（地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク）データ

世界合計の統計

世界全体のサンゴ被度の時系列推移（図8）を見ると、正規化されたサンゴの被度は約 0.3 である。1990 年代末以前のデータは、サンプル数が少なく、ランダムサンプリングが行われていないため、不確実性が大きく、ほとんど意味がない。

GCRMN のデータを全世界で集計し、1990 年後半の信頼できる記録が始まって以来のデータを見ても、サンゴの被度が大きく減少しているという主張は裏付けられない。最悪

の事態として、2000年から2019年にかけてサンゴの被度は7%減少した（ 0.31 ± 0.02 から 0.29 ± 0.02 ）と考えられるが、その差よりも誤差の方が大きいため、統計的な有意性には疑問が残る。また、2000年から2010年の間にサンゴの被度は明らかに約10%増加しているが、これは自然変動によるものかもしれないし、サンプリング地点がランダム化されていないためにデータに誤差が生じているのかもしれない。もしデータの固有変動率が10%前後であるなら、2000年から2019年にかけての7%減というデータを鵜呑みにするのは得策ではない。

確かにデータからは、この20年間におけるサンゴ被度の急激な純減は見て取れない。さらに、20年間しか有効なデータがないため、世界全体の数値の自然変動を判断するのは困難である。

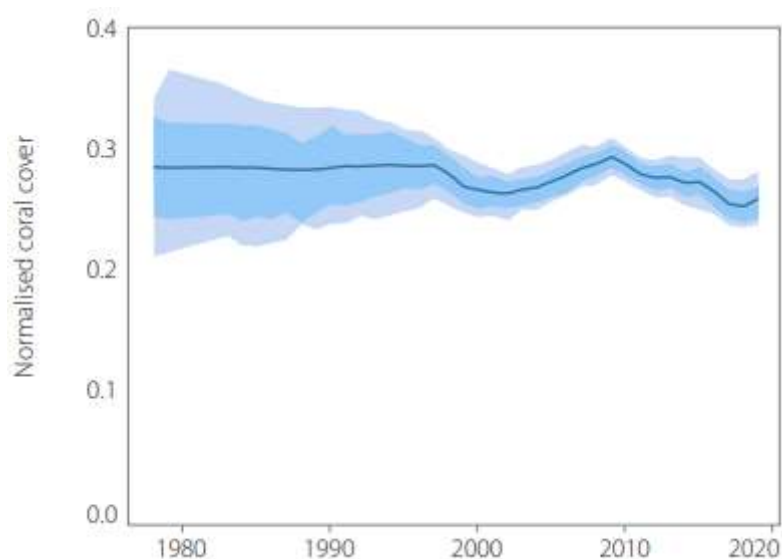


図8：世界のハードコーラルの被度

ハードコーラルの世界平均被度（実線）と80%信頼区間（濃い網掛け）、95%信頼区間（薄い網掛け）。

グラフはGCRMNデータレポートから再作成。

注：1998年以前のデータは、測定数が少なく、サンプリング地点のランダム化に問題があったため、不確実性が非常に高い。

地域データの概要

GCRMNデータは、10地域の全データの概要を提供している（図9）。サンゴ礁の数で見ても最も重要な4つの地域（東アジア：30%、太平洋：27%、オーストラリア：16%、カリブ海：10%）について、以下で詳しく検討する。

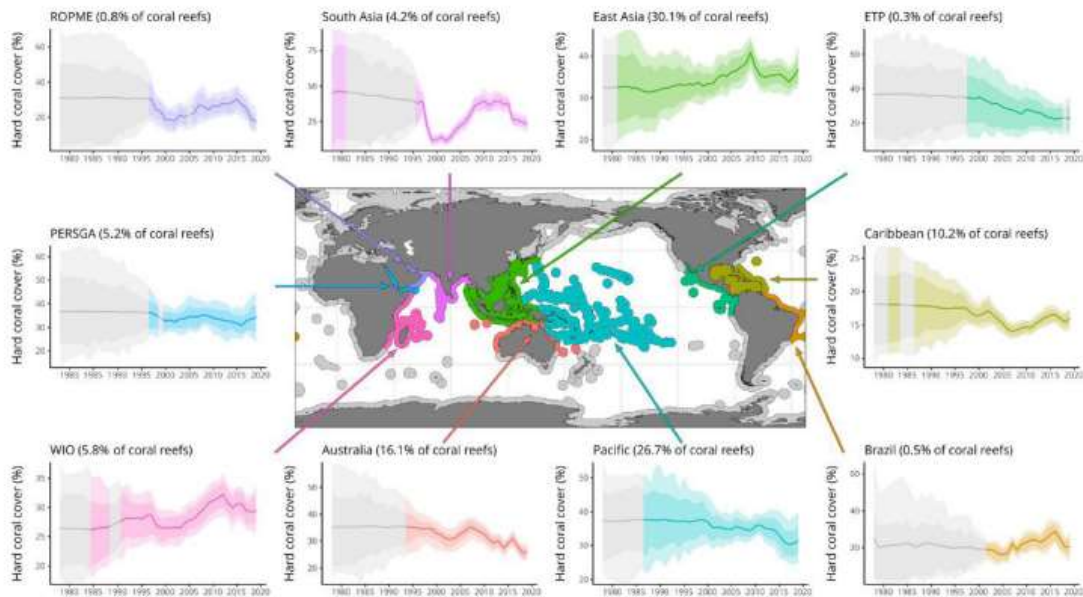


図9：世界各地域におけるサンゴ被度

GCRMN の 10 地域における生きているハードコーラルの平均被度とその長期的な推移。実線は推定平均値を表し、80%信頼区間（濃い網掛け）と 95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のレベルを表す。灰色の部分観測データがない期間を表す。トレンドは、中央の地図に示されている GCRMN の地域に合わせて色分けされている。世界のサンゴ礁の総面積のうち、各地域が占める割合をサンゴ礁の割合（%）で示した。ETP は東部熱帯太平洋。PERSGA は紅海とアデン湾。ROPME は ROPME 海域（ペルシャ湾）。WIO は西インド洋。

注：この図は GCRMN の報告書から直接コピーしたものであるため、本稿とは異なり、サンゴ被度をパーセンテージで報告している。

東アジア

東アジア地域には、日本、中国、タイ、韓国、インドネシア、フィリピン、マレーシア沖が含まれる。この地域には世界のサンゴ礁の約 30%が存在し、地球上で最も高温の大洋域であるインド太平洋ウォームプールの中に位置する「コーラル・トライアングル」もそのひとつである⁴¹。そこには最も多様で成長が早いサンゴが生息している。

この地域のサンゴ被度は、平均 0.35 程度で変動している（図 10）。1990 年代末以前のデータは、サンプルサイズが小さく、サンプリング地点がランダム化されていないため、不確実性が非常に大きく、ほとんど価値がない。2019 年のサンゴ被度は 0.35 ± 0.05 であり、不確実性の幅が大きいため、この数値は記録中の他のどの時期とも統計的な違いはなく、2010 年頃の名目上のピーク値を含む他の全ての日付や、明らかにサンゴ被度が低い

2000年以前のデータとも、2019年の数値の不確実性の幅が重なっている。しかし、仮に不確実性の幅が小さかったとしても、このデータセットから、この地域のサンゴ被度は長期的に変化していないと考えられる。

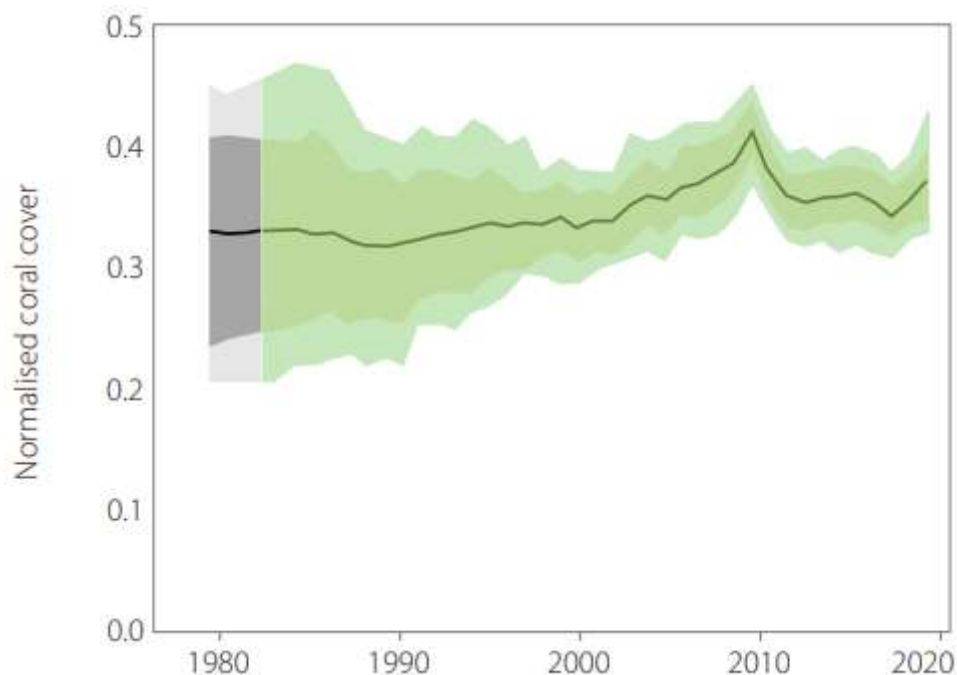


図 10：東アジア地域におけるハードコーラルの被度

実線は平均サンゴ被度を示し、80%信頼区間（濃い網掛け）と95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のレベルを示す。灰色の領域はフィールドデータが得られなかった期間を表す。グラフはGCRMN データレポートより直接引用。

注：1998年以前のデータは測定数が少ないことと、調査におけるランダム化に問題があることから極めて信頼性は低い。

東アジア地域のデータは、サンプリング方法の変更やサンプリングのランダム化の欠如による潜在的な問題を検証するために、より詳細に分析する必要がある。図 10 のデータの不確実性の幅は、以下の2つの問題点のために、示されているよりもはるかに大きいと考えられる。

- ・2022年に発表されたGCRMNの別の報告書によると⁴²、インドネシア、マレーシア、フィリピンでは、1990年から2010年までのデータがほとんどない。しかし、これらの地域⁴³は、東アジア地域のサンゴの約75%、世界のサンゴの20%以上をも占めている。
- ・サンゴの被度を測定した2570地点のうち、15年以上の記録があるのはわずか158地点で、そのうち142カ所は日本であった。日本のサンゴは全体のわずか3%である⁴⁴。この

ように、この海域の限られた質の高いデータは、サンゴが極端に少なく、代表的とはいえない地域の測定値に支配されてしまう。このため、長期的なトレンドを推察するには注意が必要である。

同様の問題は、GCRMN が対象としている他のほとんどの主要地域にも存在する。

太平洋地域

世界のサンゴ礁の約 27%を占める太平洋地域の時系列データ（図 11）を見ると、2019 年のサンゴ礁の被度は約 0.31 ± 0.06 であった。1990 年代後半以前のデータについては、サンプル数が少ないことに起因する不確実性が極めて大きいため、ほとんど価値はない。これらの大きな不確実性の幅は、2019 年の数値が記録中のどの時期とも統計的に差異がないことを意味しており、2010 年前後の名目上のピークを含め、他のすべての日付と 2019 年の数値の不確実性の幅が重複している。仮に不確実性の幅がもっと小さかったとしても、このデータからわかることは、サンゴの減少は 10%程度に過ぎないということである。

この地域はまた、GCRMN のデータにおけるサンプリング地点の非ランダム化問題も浮き彫りにしている。図 11 は 1987 年頃⁴⁵からのデータを示しているが、詳しく分析すると、1987 年から 1997 年の間すべてのデータは 7 つの小地域のうちの 1 つ（主にフランス領ポリネシア）からしか得られていないことがわかる。その地域は太平洋地域のサンゴの 10%しか占めていないのだ。したがって、図 11 の 1997 年以前のデータは、太平洋地域全体を表しているとは言えないのである。

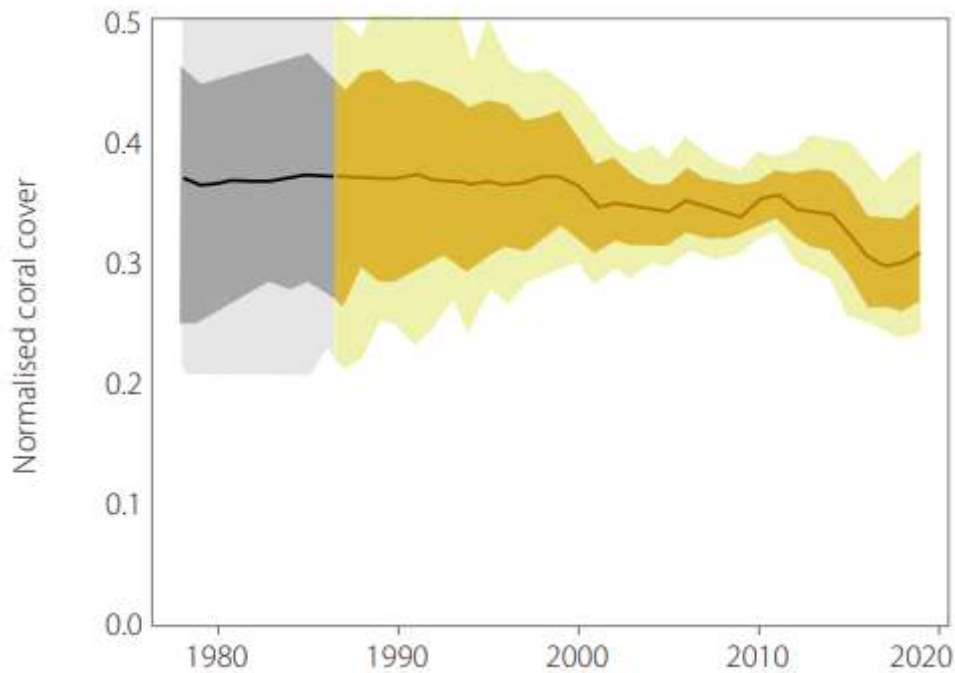


図 11：太平洋地域におけるハードコーラルの被度

実線は平均サンゴ被度、80%信頼区間（濃い網掛け）と 95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のそれぞれのレベルを示す。グレーの部分は、現地データが得られなかった期間を表す。グラフは GCRMN データレポートから直接引用。

注：1998 年以前のデータは、測定数が少なく、サンプリング地点のランダム化に問題があるため、不確実性が非常に高い。

オーストラリア地域

オーストラリア地域には、GBR（グレートバリアリーフ）、西オーストラリア州、ココス（キーリング）諸島/クリスマス諸島のデータが含まれる。この地域のサンゴの 85% を占める GBR のデータは、図 4～7 に示した長期モニタリング方式とは異なる方法論（底生生物調査）を用いている。また、GCRMN のデータには、GBR の一部ではない「沿岸」のサンゴ礁も多数含まれており、そこは全体としては GBR の 1% の大きさしかない。残念ながらこのことは、サンプリング地点のランダム化に疑問を投げかけるものであり、また、非常に面積の小さいサンゴ礁に偏ってしまっているという問題がある。

世界のサンゴの約 16% を占めるオーストラリア地域の時系列データ（図 12）を見ると、2019 年の被度は約 0.26 ± 0.025 となっている。図 12 は、最新のデータ⁴⁶を使って、現在までの時系列データを更新した 2022 年の推定値 0.31 ± 0.025 も示している⁴⁷。

不確実性の幅が大きいいため、2022年の数値は、記録期間中の他のどの時期とも統計的に差異はない。2022年の数値の不確実性幅は、2007年前後の推定ピーク時のものを含む他のすべての日付と重複している。

GBRだけのデータ（西オーストラリアとココス（キーリング）諸島/クリスマス諸島のデータを含まない）を図13に示す。GBRはこの地域のサンゴの約85%を占めているため、地域別集計と非常によく似ている。図4と図13（どちらもGBRのデータ）の比較は興味深い。なぜならば方法や場所の選択によって、サンゴ被度がどのように異なる推定値になるかを示しているからだ。図4は、毎年約1000kmに及ぶトランセクトで行われるマンタ・トウ（Manta-tow）法の調査に基づいているのに対し、図13は、短い写真撮影によるトランセクトに基づいている（また、そこには非常に多くの小さな裾礁も含まれている）。この2つの調査結果は、ほとんど同じ機関が実施したものであるにもかかわらず、大きな違いが現れる⁴⁸。このことは、たとえ最良のモニタリング地域であっても、方法の違いがいかに結果に影響するかを明確に示している。

従って、特にGCRMNのデータにおいては、常に変化する方法論と非ランダムに選ばれた非常に小規模な地域が含まれるという問題があるため、サンゴの被度のわずかな変化に対して、あまり深読みするのは得策ではないと言える。

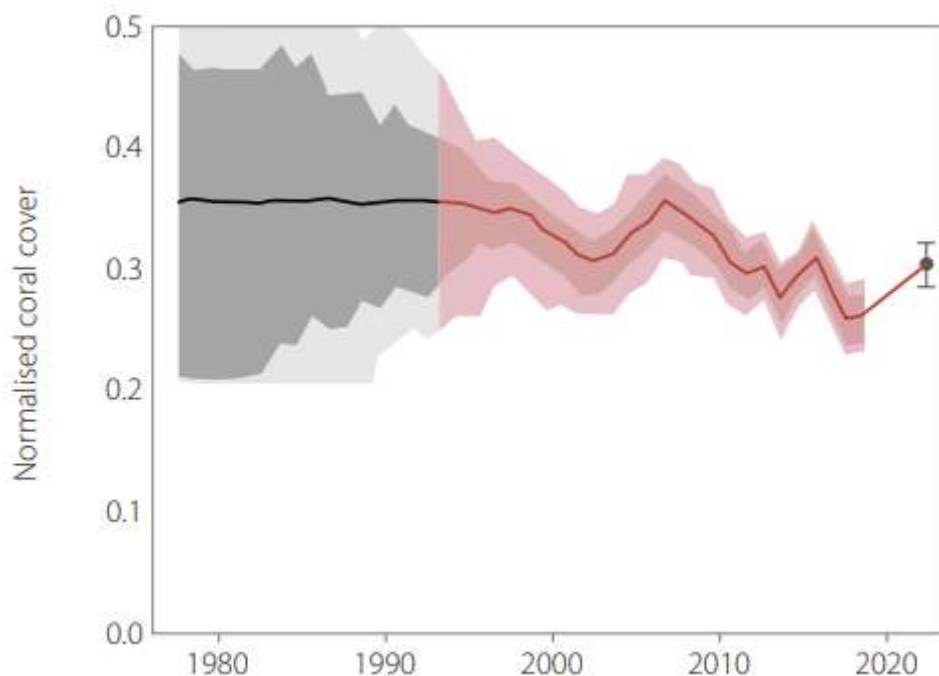


図12：オーストラリア地域のハードコーラル被度

実線は平均サンゴ被度、80%信頼区間（濃い網掛け）と95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のそれ

ぞれのレベルを示す。グレーの部分は、現地データが得られなかった期間を表す。グラフは GCRMN データレポートから直接引用。

尚、2022 年のデータは、他の地域に変化がないと仮定し、AIMS ウェブサイトから最新の GBR データを用いて計算した。

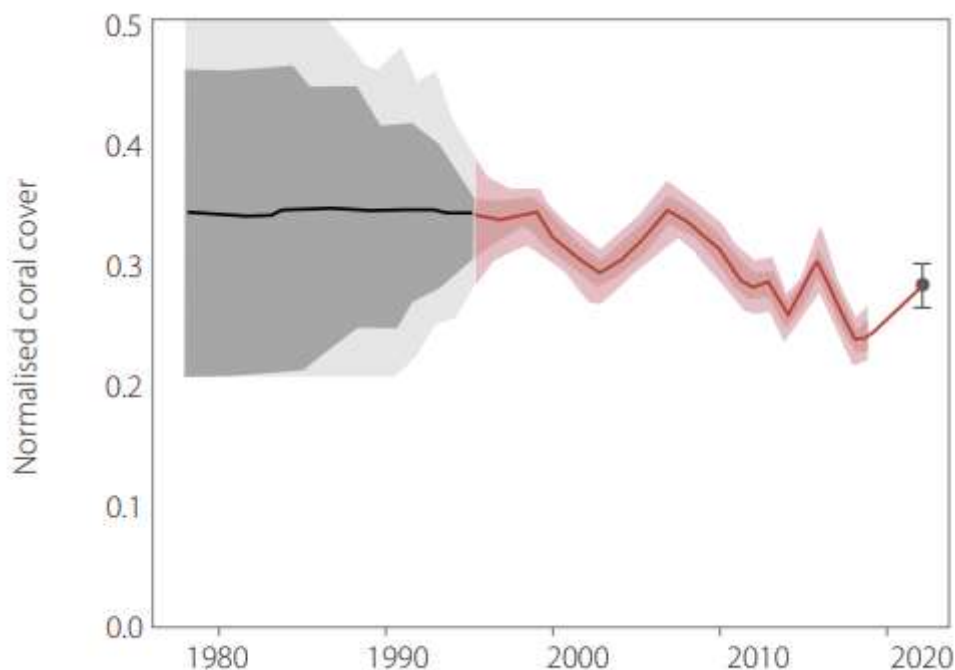


図 13：GBR 地域のハードコーラルの被度

実線は平均サンゴ被度、80%信頼区間（濃い網掛け）と 95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のそれぞれのレベルを示す。グレーの部分は、現地データが得られなかった期間を表す。グラフは GCRMN データレポートから直接引用。

この図と図 4 を比較すると、サンプリング方法の違いとランダム化の欠如の影響がわかる。2022 年のデータは、AIMS ウェブサイトから最新の GBR データを用いて計算した。

カリブ海地域

世界のサンゴ礁の約 10% を占めるカリブ海地域のデータ（図 14）は、 0.15 ± 0.02 程度のばらつきがある。その差は不確実性の幅と同程度であるため、時系列データの変化を見分けることは困難である。一方 0.15 という数値は、0.2 から 0.4 の間で変動する傾向がある世界の他のほとんどの地域と比べると、非常に低い。これは、カリブ海のサンゴ礁が測定開始前にすでに大きなダメージを受けていたためかもしれない。カリブ海のサンゴ礁は、太平洋やグレートバリアリーフの比較的自然のままのサンゴ礁よりも、人為的な被害

を受けていることは確かである。しかし、この違いは、カリブ海が他の主要なサンゴ礁から隔離されていることの現れである可能性もある。というのもカリブ海は300万年以上もの間、世界の他の主要なサンゴ礁地域から隔離されていたからである^{49,50}。

そして、過去20年間にサンゴの被度が大きく減少したという兆候は見られない。

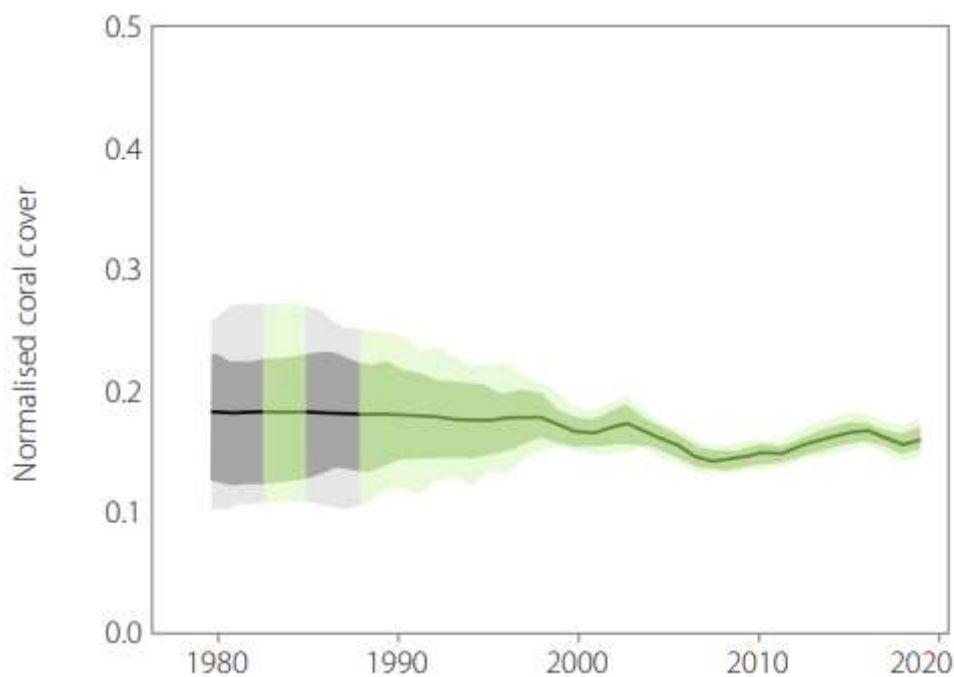


図14：カリブ海地域のハードコーラル被度

実線は平均サンゴ被度、80%信頼区間（濃い網掛け）と95%信頼区間（薄い網掛け）は不確実性のそれぞれのレベルを示す。グレーの部分は、現地データが得られなかった期間を表す。グラフはGCRMNデータレポートから直接引用。

注：1998年以前のデータは、測定数が少なく、サンプリング地点のランダム化に問題があるため、不確実性が非常に高い。

結論

本稿で検討したデータは、ここ数十年の間に世界中でサンゴが激減したという主張を裏付けるものではなかった。過去6年間に4回も壊滅的な白化現象に見舞われたにもかかわらず、最も一貫した、そして最も長い記録があるGBRにおいては、かつてないほど良好な状態にあることを示している。

1995年から2020年の間に、GBRのサンゴの被度は50%減少するという、科学機関が作成した査読付き論文に基づく報道⁵¹を、メディア上で見つけることは簡単である。しかし本稿のデータは、サンゴ礁は非常にダイナミックなシステムであり、自然現象によってサンゴが大量に失われても、10年ほどで回復することが多いことを示している。科学機関は、サンゴが失われた時には非常に声を荒げるが、回復するにつれてすっかりおとなしく静かになる。この一貫性のない行動は、科学機関の誠実さに大きな問題があるのではないかという疑念を抱かせる。

GCRMNによって編集された、世界中の他のサンゴ礁のデータは、不確実性の幅が大きいのみならず、その幅が過小評価されているため、重大な限界がある。これは特に2000年以前のデータに当てはまる。調査の方法に大きな変化があっただけでなく、サイト選択におけるランダム化の適切さに欠如がある。その最たる例が、1997年以前の太平洋地域のほとんどすべてのデータが、フランス領ポリネシアのわずかな地域からしか得られていないことである。フランス領ポリネシアは太平洋のサンゴの10%しか占めておらず、これは明らかに太平洋のランダムサンプルとは言えない。そのため、不確実性の幅を推定するのは非常に難しくなってしまう。誤差や自然の変動性を考慮すれば、この20年間で世界のサンゴの被度が変化したとは言えない。GCRMNのデータが改善されてゆくにつれて、不確実性の幅は減少し、サンゴの被度の微妙な変化も解明できるようになるだろう。

GCRMNのデータに関するGCRMN自身や他の人たちの論評で心配されるのは、サンゴの被度が増加した他の期間に触れずに、サンゴが明らかに減少した期間に議論が集中していることである。また、データの不確実性や自然変動性を無視していることもしばしばである。例えば、世界のサンゴのデータ(図8)を基にした多くの報道⁵²では、2008年から2019年の間に14%のサンゴが減少したとしているが、非常に大きな不確実性の幅があることについては一般的に言及されていない。これはGCRMNによる、元となる報告書で適切にデータが扱われていないためでもある。現実には、サンゴの被度の変化は小さすぎて解明できないことが多いのだ。このようなGCRMNのデータの不適切さは、科学組織としての健全性にさらなる疑問を残すものである。

サンゴ礁に関する明るいニュースは軽視されがちだ。例えば、2022年にGBRのサンゴ被度が過去最高を記録したことは、サンゴ礁の科学・管理機関やメディアによってすぐさま無視された。あるいは成長の早いサンゴ⁵³だけが回復したと主張したのだ。さらに、これらのサンゴは白化の影響を最も受けやすい(ハリケーンやオニヒトデの影響も受けやすい)サンゴでもあるため、サンゴ礁はより弱っている⁵⁴と主張したのである。

しかし、この議論は成り立たない。というのも、過去6年間に起きた4回の白化現象で

死んだとされているのは、成長が早く（しかも脆弱な）サンゴだからである。サンゴは確かに、生き残った小さな部分から極めて急速に（1年以内に）再生することができる（いわゆる「フェニックス効果」⁵⁵）。だが、サンゴが本当に死滅した場合、幼生の生着と再生には5～10年かかる⁵⁶。数カ月で再生することはできない。したがって、サンゴ礁の被度が急速に回復したことは、サンゴ礁が白化しただけであって、死滅したのではないことを示している。

言い換えれば、ここ数年のデータは、白化現象で死んだサンゴはほとんどないことを証明しており、白化現象によるサンゴの死滅は、最も影響を受けやすい成長の早いサンゴでさえも、ほとんどなかったことを表している。サンゴ礁は10年でサンゴが2倍にも4倍にも増える。白化現象によって数パーセントのサンゴが失われたとしても、些細なことなのだ。サンゴ礁が壊滅的な打撃を受けると、ほとんどの場合、成長の早いサンゴが減少する。従って、成長の早いサンゴが復活することは驚くようなことではないし、まして心配するようなことではない。

白化現象の程度や結果について、メディアで誤解を招くような発言をする傾向があることから、研究機関の健全性についてのさらなる懸念が生じる。例えば、2016年のGBRの白化現象は、サンゴ礁の93%が影響を受けたと大々的に報道された⁵⁷。しかし、ごくわずかな白化しか起こらなかったサンゴ礁ですら、全体の93%を占める白化したサンゴ礁の一部として分類された。そしてほとんどのサンゴが白化から回復するという事実にはほとんど触れられなかった。例えるなら、ある国で主要都市のうち93%で新型インフルエンザによる死亡事例が報告され、一部の都市ではそれが1例しか報告されなかったとしても、その93%の都市の全員が死亡したかのように報道する医療当局のようなものである。現実には、その病気に罹患した人はごく少数で、死亡した人はさらに少数だったのかもしれない。同じように、2016年の白化現象では、比較的少量のサンゴが白化し、そのほとんどが回復した。

2016年の白化現象におけるGBRのサンゴの総損失は、多く見積もっても約8%である。そのほとんどが水深5m未満の浅い海域で発生した。Fradeら（2018）⁵⁸によると、水深5～40mの海域でのサンゴの損失は約3%であった⁵⁹。図4は、サンゴの損失がサンゴ礁の再生能力に比べて小さいことを示している。2016年の白化によって相当量のサンゴが死んだことは間違いないが、それは大型サイクロンによる被害よりもはるかに少なく、メディアによる過剰な報道よりもはるかに少なかった。このことは、サイクロンとオニヒトデの災害がサンゴの死滅の90%を占め、白化は10%に過ぎないというDe'athら（2012）⁶⁰の研究結果を裏付けるものである。

4. サンゴと「温水」条件下での白化現象

はじめに

多くのメディアは、科学機関の報道発表に基づき、人為的な気候変動によって気温がわずかでも上昇した場合、サンゴ礁は壊滅的な打撃⁶¹を受けると報じている。例えば、世界のメディア⁶³が広く報道した最近の研究⁶²では、産業革命以前に比べて気温がわずか1.5°C上昇しただけで、サンゴの99%以上が失われると主張している。これらの報告によると、この温暖化が2030年代初頭まで続くと予測している。本稿のセクション2に挙げたデータでは、ここ数十年、サンゴはほとんど、いや、まったくと言っていいほど失われていない。そう考えると、この予測が現実のものとなるには、今後サンゴ礁の変化の速度が急速に速まる必要がある。

わずか1.5°Cの温暖化で99%のサンゴが死滅するという事は、ごくわずかな温度変化に対してサンゴが過敏に反応することを示唆している。これほど敏感な生物が他にいるだろうか？驚くべきことに、現在冷水に生息しているサンゴでさえ、わずかな水温上昇で「破壊」されてしまうというのだ。コーラル・トライアングルのように、はるかに高い水温に生息しているサンゴがいるというのに。

この「サンゴ礁脆弱仮説」⁶⁴は、サンゴの大量白化現象が起り始めたのはごく最近のことだとも言っている。例えば、オーストラリアのジェームズ・クック大学サンゴ礁センターの著名なサンゴ生態学者は、オーストラリア放送協会のラジオで次のように述べている⁶⁵。

「...ここで重要なのは、こうした白化現象がこれまでなかった斬新なものだということだ。私が博士課程の学生だった30年前には、地域規模の白化現象などまったく聞いたことがなかった。白化現象は地球温暖化による人間の発明なのだ。」

しかしながら記録によると、1982年以前に世界でサンゴの白化現象が起きた記録は26件あり、そもそもこの現象は、1929年にイギリスからGBRを訪れた最初の科学探検隊により観察された⁶⁷。白化を表現した最も古いものは、1862年に出版されたフォン・ランソネットのリトグラフ(図15)であろう⁶⁸。白化が「斬新な」現象ではないことは間違いない。



図 15：紅海のサンゴの白化のリトグラフ（1862 年）

フォン・ランソネット画。Cedhagen（注 68）参照。白いサンゴは明らかに白化している。

しかし、サンゴの大量白化は新しい現象なのだろうか。サンゴが広範囲にわたって大量に死滅する大規模な白化現象は、1990 年以前にも起きていたのだろうか。だがサンゴ礁の研究が本格的に始まったのは 1960 年代以降であることを忘れてはならない。それ以前のサンゴ礁については、ほとんど何もわかっていなかったのだ。例えば GBR では、1930 年代には海洋科学者の数は事実上ゼロであったし、1960 年までにはほんの一握りであった。だが現在では 1000 人以上の科学者がいるはずだ。そしてサンゴ礁の大規模な調査が始まったのは 1980 年代になってからである。その調査によりサンゴの大量産卵など、驚くべき発見があった。GBR のすべてのサンゴが一晩から二晩かけて産卵し、表面に大量の卵の塊ができる。水面で非常によく見えるこのような顕著な現象が発見されたのがごく最近なら、水面下で起こるため観察がはるかに難しいサンゴの大量白化現象が、1990 年代まで記録されなかったのは驚くべきことであろうか。

例えば 1925 年に大規模な白化現象が起きたとしたら、誰が気づいただろうか。誰が測定していただろうか。そして誰が気にしただろうか。スキューバのような技術も存在しなかった。サンゴの大量白化現象が、科学者たちが白化現象を研究しようとしてきたときにちょうど始まっていたとしたら、それは確かに驚くべき偶然である。

多くの白化現象はエルニーニョの年に発生することを考えると*、1982 年以前に観測さ

れた 26 件の白化現象のいくつかは、現在で言うところの大量白化現象の一部であった可能性が高い。

この半世紀で 1°C 弱の気温上昇によってサンゴがダメージを受けたのか、という疑問に答えるためには、サンゴの生態を調べる必要がある。後述するように、サンゴは地球温暖化に対して特別なリスクを持っているわけではなく、むしろそれをうまく受け入れている。サンゴの白化現象は、死の宣告としてのみとらえるべきではなく、実際には、気温の変化に対する驚くべき適応反応なのである⁶⁹。

*エルニーニョとは、深海から湧き出る暖かい海水が広大な地域に影響を及ぼす気象現象である。

サンゴと藻類の仲間たち

動物であるサンゴのポリプは、光合成によって太陽光からエネルギーを得ることができない。しかし、数億年の進化の末、ポリプはポリプの内部に生息する褐虫藻と呼ばれる微細な藻類とパートナーシップを築いた⁷⁰。褐虫藻は植物と同じように葉緑素を持っているため、太陽光からエネルギーを得ることができる。ポリプは褐虫藻からエネルギーを得る一方、褐虫藻はポリプの中で快適な住処を得る。一部のサンゴは、代替エネルギー源としてプランクトンを消費することもできる。褐虫藻との共生関係は、後述するように、サンゴがさまざまな温度に適応するための鍵となる。

幼生サンゴは通常褐虫藻を持っていないが、様々な種類の褐虫藻が浮遊している周囲の水から褐虫藻を獲得することができる。褐虫藻はポリプの中で成長する。しかし、場合によってはこの居心地の良い関係が崩れ、サンゴは褐虫藻を急速に排出するときがある。褐虫藻はサンゴのポリプの色の大部分⁷¹を担っているため、褐虫藻を排出するとサンゴは「白化」し、透明なポリプ組織から骨格が見えるようになる（図 16）。新たな褐虫藻を取り込まないとこのままではサンゴのポリプは飢餓状態に陥る。



図 16：サンゴの白化

サンゴの白化は共生藻類が排出されることで起こる。それによりサンゴは白く変わる。藻類はサンゴの大部分に色を与えている。この写真のすべてのサンゴが白化した。

白化は生き残りの戦略

サンゴはさまざまなストレス下で褐虫藻を排出する。最もよく知られていて劇的な例は、高温と光の組み合わせによるものだ。また、冷たい水や空気⁷²にさらされたときや、河川から、あるいは降雨による淡水が多すぎて海水の塩分濃度が低下⁷³したときにも白化する。熱による白化は、死の宣告というよりも生存戦略である。サンゴが白化するのとは、体内の褐虫藻がポリプにとって「毒」になるか、少なくとも不利になるためだ。そうすることでポリプは褐虫藻を排出し、白化しなければならない。このプロセスは、自然界で見られる多くの生存戦略と似ている。例えば、オーストラリアの樹木の多くは、極端な干ばつの際に水を節約するために葉を落とす。しかし干ばつが終わると葉を再生させるのである。

ほとんどのサンゴはストレスから影響を受け白化しても生き残る⁷⁴。ストレスが解消されると、褐虫藻の群集や個体数を取り戻したり、再生したりするが、必ずしも白化前と同じように戻るとは限らない⁷⁵。

サンゴは、褐虫藻を「入れ替える」あるいは褐虫藻を変化させることに非常に長けている⁷⁶。ある種のサンゴは、多くの異なる種類の褐虫藻を選ぶことができ、常に数種類の褐虫藻を体内に持つこともできる。

ある種の「ハイオクタン」、褐虫藻は、サンゴの成長を早めるが、高温による白化の影響を受けやすくなる。一方、「ローオクタン」褐虫藻は、サンゴの成長は遅いものの、白化の影響を受けにくい。特定の場所、特定の時期において、どちらの戦略が優れているかは、サイコロを振るようなもので、天候に左右される⁷⁸。

多くのサンゴ、特に軽くてデリケートな「プレート」サンゴや「スタグホーン」サンゴ（図 1b）の生きる上での戦略は、急速に成長し、そして短命で終わることだ。彼らは軽量の炭酸カルシウムの骨格を作るため、20 年以内に熱帯低気圧によって消滅してしまうであろう。また、オニヒトデに食べられやすい。白化現象とサイクロンの発生率はほぼ同じで、物理的にデリケートでダメージを受けやすいこの種のサンゴが最も白化の影響を受けやすく⁷⁹、寿命がわずか数十年であることは、おそらく偶然ではないであろう。ハイオクタンの褐虫藻を摂取し、白化で死ぬ危険を冒しながらも急速に成長することは、彼らの生命維持戦略の一部なのである。

その対極にあるのが巨大なサンゴである。何世紀も生き続け、炭酸カルシウムの固まりとなり、大きさは数メートル、重さは数トンにもなる。これらのサンゴは成長が遅く、通常、サイクロンやハリケーンが通過しても比較的無傷で済む。オニヒトデの大発生にもあまり影響を受けない。彼らは長期的な生命戦略を持っており、白化現象による死にはあまり影響を受けない。

こうした温度変化への適応力を持つ生物は、他にはなかなかいない。多くの生物が遺伝子の構成を変えるのに何世代もかかるのに対し、サンゴは、白化の際に褐虫藻を入れ替えるだけで、数週間で温度の変化に適応できるのだ⁸⁰。

このように、サンゴは気候の変化に対応する驚くべき独自の能力を持っている。サンゴは本当に「炭鉱のカナリア」なのか、それとも地球上で最もタフな生物のひとつなのか、あるいはその中間なのか。彼らが気候変動の影響を最も受けやすい生物のひとつであるかどうかははっきりしていない。サンゴは何億年も生き延びてきたが、そのほとんどの時期は、地球の歴史上、比較的涼しい現在よりもはるかに暑い時期だった。

最後に

世界中のデータから、白化したサンゴは通常死滅せず、白化によって致命的な被害を受けたサンゴ礁でも力強く再生することが一貫して示されている⁸¹。過去 6 年間で 4 回も壊滅的な白化現象に見舞われたにもかかわらず、サンゴの生息数が記録的な高水準を維持しているのは、GBR だけではない。例えば、中部太平洋のパルミラでは、2015 年の白化現

象でサンゴの90%が白化したが、現在ではサンゴの死滅は10%未満にとどまり⁸²、サンゴ礁は良好な状態に戻ったと報告されている。同様の朗報は、キリバス⁸³、チャゴス諸島⁸⁴、西オーストラリアのロウリー・ショールズ⁸⁵、日本⁸⁶など、基本的に世界中から届いている。AIMSの長期モニタリング・チームのように、たとえ時流に逆らっているとしても、健全な科学を行ってデータを報告してくれる科学者や組織がまだ多く存在することに感謝しなければならない。

これらの朗報の中で印象的なのは、次のようなことである。科学者たちは、サンゴの白化に対して、全般的な過剰反応や誇張があったのではないかと、少なくとも公の場で疑問を呈することはほとんどない。おそらく彼らは、白化が深刻化しているという推測は間違っていて、ほんの20年前にはほとんど何もわかっていなかった自然現象なのだ、と内心では考えているだろう。彼らは、サンゴ礁科学界の集団思考に縛られて、今までの定説に異議を唱えることは危険だと考えているのだろうか。

サンゴ礁について科学界が、白化の脅威を誇張していたことや、サンゴの驚くべき適応力と強靭さを示す最近の研究報告を故意に軽視したことを素直に認めるとは思えない。これらの組織や、サンゴ礁を研究している著名な科学者、世界のサンゴ礁について人騒がせな嘘をつくことで名声を築いてきた高名な科学者たちが、突然自分たちの間違いを認める可能性はほとんどない。何万もの雇用が、世界のサンゴ礁はそう遠くない未来になくなる、という命題に依存しているのだから。

科学の多くの分野、特に、間違っていたとしてもほとんど現実への悪影響を及ぼさないような分野では、誤りは隠蔽されて何十年も知られないことがあり、そしてその誤りが完全に集団思考に支配される。これは、科学者が研究資金を集め、研究成果を発表する能力が同業者の承認によって決定されるという、査読のようなシステムの結果であり、必然的な事態なのである。集団思考を生み出すのに、これほど適したシステムはない。

サンゴに関する一部の朗報は非常に勇気づけられるニュースではあるが、世界中のサンゴ礁に関する最新の統計、特にGBRの最近の統計は、世界のサンゴ礁がすべてうまくいくことを証明するものではない。しかし、一部の例外を除いて⁸⁷、サンゴ礁の科学界に科学的誠実さが欠けていることは疑いの余地なく証明された。彼らはあまりにも頻繁に人騒がせな嘘をついてきた。非常に残念なのは、このコミュニティにはまだ多くの優秀な科学者がいて、良い仕事をしているにもかかわらず、彼らが汚染されてしまっていることである。彼らは用心ぶかくなる理由がある。集団的思考から脱却しようとする、学者人生を絶たれる結果になりかねないからだ。

サンゴ科学界が誠実さを失ったことの最大の問題は、彼らの言うことを信じるのがほとんど不可能になったことだ。そして、多くのサンゴ礁が、個体数の多い地域で実際に問題を抱えている。あるグループが信用できないからといって、彼らが常に間違っているわけではない。例えば、カリブ海のサンゴ礁が悲惨な状況にあるのは乱獲のせいかもしれない。しかし集団思考を打ち破り、学術的な厳密さを取り戻さない限り、サンゴ礁について何かを信じることができるだろうか。

サンゴ礁の研究コミュニティにおける集団思考は、科学の多くの分野で見られる問題の縮図に過ぎない。科学的再現性の危機については多くのことが書かれてきた。最近の科学文献のおよそ 50% に重大な欠陥があることは、現在では十分に認められている⁸⁸。そしてこのことは決して秘密ではないのだが、一般にはほとんど知られていない。科学研究機関は、こうした信頼性の低さが意味するものについて語りたがらないのである。これほど信頼性に欠ける分野が他にあるだろうか？

サンゴ礁科学界の改革が内部から生まれることはありえない。同業者グループ外の科学者が徹底的な敵対者監査を行うという「レッドチーム」方式のみが、変化をもたらすことができるのだ。

レッドチームは、研究コミュニティの中に深刻な問題があることが明らかになったときに、断固とした姿勢で政治的なレベルで対処しなければならない。気候変動に関する広範な議論のように、科学的な問題は数多くある、そこでは、科学的助言の信頼性が低く、科学者たちのほとんどがイデオロギーに突き動かされ、「政治の手先」になっていると疑うことができる⁸⁹。しかし、科学機関の信頼性の低さは、サンゴ礁、特にグレートバリアリーフに関する最新の統計によって明らかになった。かつて信頼を寄せていた科学者たちは、私たちにこう言った、サンゴ礁は絶望的で、大量死が起きていると。だがその間違いが証明された。

5. 総括と結論

・世界のサンゴ礁の約 15% を占める⁹⁰ グレートバリアリーフのサンゴ被度の記録は、世界で最も長く、信頼できるものだ。2022 年のサンゴ被度は 0.34 ± 0.04 と、1985 年の記録開始以来最も高い数値を示した。GBR のサンゴ被度には顕著な時間変動があった。最もサンゴ被度が低かったのは 2011 年の 0.12 ± 0.03 であった。

・2022 年には、グレートバリアリーフのサンゴの数は 2011 年の少なくとも 2 倍に増えている。

・グレートバリアリーフのデータから、サンゴ礁は10年単位で死滅と再生の大きなサイクルを繰り返すことが多いことがわかる。サンゴ礁は、多くの温帯林や熱帯雨林のような静的な生態系ではない。

・サイクロンやハリケーン、オニヒトデの大発生、白化現象によって、サンゴがほぼ完全に失われることがあるが、この現象は10年、20年かけて回復する。乾燥地の森林では、山火事により森林はほぼ完全に破壊されるがその後数十年かけて回復する。このような変動は、繰り返し起こる破局などではない。

・地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク（GCRMN）で集計された世界各地のデータは、グレートバリアリーフのデータよりもはるかに精度が低い。その理由としては、サンプリングサイズが小さいこと、サンプリング地点がランダム化されていないこと、そして方法論がまちまちであることが挙げられる。2000年以降になってようやく不確実性の幅が十分に低くなり、利用可能なデータとなった。

・GCRMNのデータを全世界で集計しても、2000年頃に信頼できる記録が始まって以来、サンゴ被度が大きく減少しているという主張は裏付けられていない。最悪の場合には2000年から2019年にかけてサンゴの被度は7%減少した（ $0.31 \pm 0.02 \rightarrow 0.29 \pm 0.02$ ）かもしれないが、この変化の統計的有意性は非常に疑わしい。というのも、誤差の大きさがその差と同程度だからである。加えて、データの自然変動率も10%前後であり、2000年と2019年の差よりも高くなっている。

・世界のサンゴ礁の30%を占め、最も多様なサンゴが生息している「コーラル・トライアングル」を含む東アジア海域のGCRMNデータを見ると、記録開始以来、統計的に著しいサンゴの減少は見られていない。東アジア地域は、サンゴ礁の近くに住む人間の人口が最も多く、地球上で最も熱い水の塊であるインド太平洋ウォームプールを含んでいる。

白化によってどれだけのサンゴが死滅したか

・海水の高水温が原因で起こる白化は、非常に小規模であることが多く、また、それが大きなものであったとしても、常にサンゴは急速に再生している。

・高水温による白化の影響に関する最も優れたデータは、グレートバリアリーフのものであり、それによると白化の影響は非常に小さい⁹¹。グレートバリアリーフは、過去6年間に壊滅的と思われる白化現象に4度見舞われたにもかかわらず、2022年のサンゴの被度は

記録的に高かった。

・サンゴは大きな損失から回復するのに少なくとも5年から10年かかる。2022年のグレートバリアリーフのサンゴの被度は記録的な高さであることは、科学機関が報告したサンゴの大量死が誤りであったことを証明するもので、機関の誠実さについて深刻な疑問を投げかけている。またメディアは悪いニュースを誇張して報道する傾向があるため、科学機関の誤報の影響はさらに大きくなっている。

・サンゴ礁に関する朗報は往々にして科学団体によって軽視される。例えば、グレートバリアリーフのサンゴ被度が過去最高となったという喜ばしいニュースは、即座に軽く扱われた。そして彼らはサイクロンやオニヒトデの大発生、白化の後に回復したのは、成長の早いサンゴだけだと主張したのだ。しかし、そもそも被害を受けたとされたのは成長の早いサンゴであること、そして、それでもなお再生に5~10年はかかるという事実は、無視された。

・もし、成長の早いサンゴがたった6年の間に4回も大量に死滅したのなら、現在、このサンゴが記録的な量に増えている可能性はあるのだろうか？

サンゴの適応力

・サンゴは熱帯の暖かい海水で一番よく育つ。水温が1°C上昇するごとに、サンゴは約15%速く成長する。

・サンゴの白化は、サンゴのポリプの中に共生している藻類（褐虫藻）が排出されることで起こる。ほとんどのサンゴは死ぬわけではない。そして、通常は褐虫藻を再度取り入れる。

・白化現象は死の宣告ではなく、生き延びるための生存戦略として捉えるべきである。白化とは、サンゴが内部に生息する褐虫藻の種類を選択するためのメカニズムであるからだ。褐虫藻の種類が異なると、サンゴは白化しやすくなったり、白化しにくくなったりするのである。

・サンゴは温度の変化に最も適応しやすい生物のひとつである。多くの種が温度変化に適応するために何世代もかけて遺伝子を変化させるのに対し、サンゴは褐虫藻を入れ替えるだけで、数週間のうちに温度変化に適応することができるのだ。

・白化は、よく指摘されるような、人間によって引き起こされた新しい現象ではない。サンゴに関する最古の科学的研究では、この白化現象が報告されている。しかし、ここ数十年で海洋科学者の数が爆発的に増え、技術も驚異的に向上したため、今ではこうした現象を簡単に観察できるようになった。

・私たちはまだサンゴ礁を理解し始めたばかりだ。なぜならサンゴ礁は水中に隠れているため、50年前にはほとんど何も知られていなかったからだ。白化現象やオニヒトデの大発生、サンゴの大規模な産卵現象が発見されたのはごく最近のことだ。発見された当初は、サンゴの定期的な死滅現象を心配することに一理あった。しかし、数十年にわたる研究の結果、サンゴ礁の将来は極めて明るいことが分かった。乱獲と汚染の問題を最小限に抑えることができれば、サンゴ礁に関する見通しは非常に明るい。

・世界中のサンゴ礁は、サイクロンやハリケーン、オニヒトデの大発生、白化現象、その他の人為的ストレスによる死滅現象に対して、目覚ましい回復力を示し続けている。自然のものであれ、そうでないものであれ、ストレスに対する回復力は、健全な生態系の強力な指標である。脆弱な生態系の場合は、些細なストレスによってさえも崩壊し、回復することはない。

・世界中のサンゴ礁が一般的に回復力を示しているにもかかわらず、カリブ海のように、深刻な懸念が残る地域もある。しかし、そこでの主なストレス要因は、水温よりもむしろ人間の活動による圧力である。

サンゴ礁は「破滅」を商売にする者たちの道具となった

・周期的に起こるサンゴの大量損失は、視覚的に壮観であり、感情を揺さぶり、メディアの心を打つ記事になる。しかし、サンゴがゆっくり完全に回復することについて報道されることはほとんどない。

・無慈悲な観察者であれば、定期的に起こるサンゴの大量死事件は、ほとんどが完全に自然な現象であるにもかかわらず、イデオロギー的な意図と金銭的な利害を持つ一部の組織に利用されていると結論づけるかもしれない。これには多くの科学団体が含まれる。

・サンゴ礁科学の全面的な監査が必要である。そうすることで重要な判断が信頼できる科学に基づいて行われるようになる。

参考文献：

In this report, only hard, shallow-water corals living in the photic zone – typically less than 40m depth – are considered, so as to be consistent with typical popular and media use of the word ‘coral’. Deep-water corals that do not rely greatly on photosynthesis of symbionts are not included. The definition used covers almost all the coral reefs that are regularly mentioned in the media as being threatened by climate change.

Bellwood, D.R., Hughes, T.P., Folke, C. and Nyström, M. (2004) . ‘Confronting the coral reef crisis’. *Nature*, 429 (6994) , 827–833.

Sweet, M., Burian, A. and Bulling, M. (2021) ‘Corals as canaries in the coalmine: towards the incorporation of marine ecosystems into the “One Health” concept’. *Journal of Invertebrate Pathology*, 186, 107538.

<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.

In this report a ‘coral reef’, or often ‘reef’ for short, refers to a carbonate platform composed largely of broken coral.

<http://ctatlas.reefbase.org/coraltriangle.aspx>.

Lough, J.M. and Barnes, D.J. (2000) . Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 245 (2) , 225–243.

<https://www.bbc.com/news/world-australia-54533971> . See also David Attenborough, who claims that ‘half the reefs corals have already died.’

<https://www.youtube.com/watch?v=7oyviAbKSM>.

<https://gcrmn.net/2020-report/>.

Some scientists also worry about possible changes in species diversity, but the main message to the media is about coral loss.

Aerial pictures of coral are of limited value as only extremely shallow coral, a few meters deep can be seen. In addition, there are very few aerial images of reefs more than a few decades old.

<https://www.abc.net.au/news/2016-01-25/south-china-sea-coral-reef-destruction-recoverable/7110878>.

<https://www.aims.gov.au/research-topics/monitoring-and-discovery/monitoring-greatbarrier-reef/reef-monitoring-sampling-methods>. For more details see

<https://platogbr.com/308-2/>.

<https://gcrmn.net/2020-report/>.

See for example <https://www.biology.ox.ac.uk/article/discovery-of-new-ecosystem-that-is-creating-oasis-of-life-in-the-maldives>.

It is not clear what ‘83% of coral reefs’ means. Many reefs do not have clear boundaries.

Does this also represents 83% of the world's coral. We can only hope that consistent methodology was used.

<https://theconversation.com/obama-protect-barrier-reef-from-climate-change-34278>.

See, e.g., Canberra Times 22/5/1970, p.7.

For their benthic surveys, which AIMS contributes to GCRMN, uncertainties of data for individual reefs are considerably higher – around 25%.

A normal distribution.

The size of the uncertainty margin should be subjected to further analysis in the future.

Note: AIMS stopped publishing the GBR average in 2017.

The Great Barrier Reef is an exception to this.

Kimura, T., L. M. Chou, D. Huang, K. Tun, and E. Goh, editors. 2022. Status and trends of East Asian coral reefs: 1983–2019. Global Coral Reef Monitoring Network, East Asia Region. See comments on p. 136.

See <https://platogbr.com/308-2/> for details of the analysis. Nowadays, AIMS does not calculate an average coral cover for the entire GBR, although it did so until 2017. The author has therefore performed this task to create Figure 4. AIMS does not give a reason why it stopped calculating the GBR average result, even though this is the statistic of most interest to the public and management.

At first glance, this may appear as almost a threefold increase, but the uncertainty in the data means that the 2011 figure may be as high as 0.14, and the 2022 figure may be as low as 0.30.

Great Barrier Reef Marine Park Authority (2022) . Reef Snapshot: Summer 2021-22.

<https://elibrary.gbrmpa.gov.au/jspui/handle/11017/3916>.

Marshall, P. and Schuttenberg, H. (2006) . A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching. Townsville, Australia.: Great Barrier Reef Marine Park Authority. Also

<https://www.aims.gov.au/researchtopics/environmental-issues/coral-bleaching/coral-bleaching-events> .

Diaz-Pulido, G., L.J. McCook, S. Dove, R. et al., 'Doom and boom on a resilient reef:

Climate change, algal overgrowth and coral recovery'. PLoS ONE, 2009. 4 (4) : p. e5239..

AIMS stated in reference to the 1998 'most reefs recovered fully, with less than five per cent of inshore reefs suffering high coral mortality.' The inshore reef in total represent only about 1 % of the coral on the GBR.

Aerial surveys that are often used to monitor bleaching have greatly difficulty distinguishing bleached coral from dead coral.

<https://www.aims.gov.au/reef-monitoring/gbr-condition-summary-2016-2017>.

There can be a significant lag between the time the coral dies, and when those reefs are

surveyed.

Although data for 1988 is 0.42 ± 0.04 , and 2022 is 0.35 ± 0.04 , there is overlap in the uncertainty range and therefore there is no statistically significant difference between the coral cover on those two years.

The upper and lower uncertainty margins overlap with previous highest years.

'Record breaking' means the lower uncertainty bound is higher than the high uncertainty bound in any previous year.

37. These claims may be due to statements made to that affect by AIMS. However, this is an alltoo-common misunderstanding of the uncertainty bands. If there is overlap between uncertainty bands between two years, then the two years are not statistically different.

38. 2022 is 0.34 ± 0.04 , but 1986 is 0.26 ± 0.03 . <https://www.aims.gov.au/reef-monitoring/gbrcondition-summary-2016-2017>.

39. Lat, Long., -18.618305, 147.302306.

40. The value in 2022 is not statistically different from the values in 2003. There is overlap of the uncertainty bars. So 2022 is not record-breaking for Helix Reef.

41. It is 3–4 degrees hotter than the southern part of the Great Barrier Reef.

42. Kimura, T., L. M. Chou, D. Huang, K. Tun, and E. Goh (eds) (2022) . Status and Trends of East Asian Coral Reefs: 1983–2019. Global Coral Reef Monitoring Network, East Asia Region.

43. Sub-regions 1, 2, 4, and 5 of the East Asia region.

44. GCRMN data from Japan, shows major fluctuations in coral cover since 1980, but no sign of a declining trend. The last 20 years have been very stable.

45. There appears to be no explanation why 'data' is shown in the pre 1987 period when there is no data recorded at all.

46. AIMS data.

47. <https://apps.aims.gov.au/reef-monitoring/reefs>. Contact author for detailed analysis.

48. Australian Institute of Marine Science.

49. Isthmus of Panama closed around 3 million years ago.

50. <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2014-019.pdf> : Jackson J.B.C., Donovan M.K., 29Cramer K.L., Lam V.V. (eds) (2014) , Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland.

51. <https://www.bbc.com/news/world-australia-54533971>.

52. <https://www.npr.org/2021/10/05/1043372978/global-coral-reef-loss-report-climate-changewarming-oceans>.

53. Note even 'fast-growing' corals still take 5–10 years to totally cover the seabed after

complete mortality.

54. <https://edition.cnn.com/2022/08/04/australia/great-barrier-reef-high-coral-report-australiacclimate-intl-hnk/index.html>.

55. Roff, G., Bejarano, S., Bozec, Y.M., et al. (2014) 'Porites and the Phoenix effect: unprecedented recovery after a mass coral bleaching event at Rangiroa Atoll, French Polynesia'. *Marine Biology* 161, 1385–1393.

56. Diaz-Pulido, G., L.J. McCook, S. Dove, et al. (2009) , 'Doom and boom on a resilient reef: Climate change, algal overgrowth and coral recovery'. *PLoS ONE*, 4 (4) , e5239.

57. <https://www.theguardian.com/environment/2016/apr/19/great-barrier-reef-93-of-reefs-hit-by-coral-bleaching>.

58. Frade, P.R., Bongaerts, P., Englebort, N., et al. (2018) . 'Deep reefs of the Great Barrier Reef offer limited thermal refuge during mass coral bleaching'. *Nature Communications*, 9 (1) .

59. See Ridd, P. V. (2020) Reef Heresy. Connor Court, pp. 94–95 for details.

60. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208909109>.

61. <https://www.theguardian.com/environment/2022/may/10/devastating-90-of-reefs-surveyed-on-great-barrier-reef-affected-by-coral-bleaching-in-2022>.

62. Dixon AM, Forster PM, Heron SF, et al. (2022) 'Future loss of local-scale thermal refugia in coral reef ecosystems'. *PLOS Climate*, 1 (2) : e0000004.

63. <https://theconversation.com/safe-havens-for-coral-reefs-will-be-almost-non-existent-at-1-5-c-of-global-warming-new-study-176084>.

64. A term first coined by D Mason Jones. Mason-Jones, D. (2019) . Will the Great Barrier Reef Survive?: doubting the doomed reef scenario. Denhams Beach, NSW: www.journalist.com.au.

65. ABC Radio National. (2016) . Widespread coral bleaching detected on the Great Barrier Reef. [online] Available at:

<https://www.abc.net.au/radionational/programs/breakfast/widespreadcoral-bleaching-detected-on-the/7212760>.

66. Oliver, J.K., Berkelmans, R. and Eakin, C.M. (2018) . 'Coral bleaching in space and time. In: M.J.H. van Oppen and J.M. Lough (eds) , *Coral Bleaching: Patterns, processes, causes and consequences*. Springer-Verlag.

67. Yonge, C.M. and Nicholls, A.G. (1931) . 'The structure, distribution and physiology of the zooxanthellæ'. *Great Barrier Reef Exped 1928-29 Sci Rep*, 1, 135–176.

68. Cedhagen, T (2021) . 'Coral bleaching during the Little Ice Age'. *Phuket Marine Biological Centre Research Bulletin*, 78: 21–28.

69. See this article by Jim Steele for an excellent summary. <https://wattsupwiththat>.

com/2016/05/18/the-coral-bleaching-debate-is-bleaching-the-legacy-of-a-marvelousadaptation-mechanism-or-a-prelude-to-extirpation/.

70. Note: corals living in the rari-photic zone (very deep water) are excluded from consideration.

71. And also colour to many other marine organisms in which they live, for example, sea anemones.

72. <https://www.abc.net.au/news/2022-11-03/coral-bleached-abrolhos-islands-west-australiancoast/101608748>.

73. Freshwater exposure can very rapidly kill the coral. See Jones and Berkelmans (2014) <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084739.30>

74. Marshall, P. and Schuttenberg, H. (2006) . A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching. Townsville, Australia.: Great Barrier Reef Marine Park Authority.

75. Guest, J.R., Baird, A.H., Maynard, J.A., et al. (2012) . 'Contrasting patterns of coral bleaching susceptibility in 2010 suggest an adaptive response to thermal stress'. PLoS ONE, 7 (3) , e33353.

76. Baker, A.C. (2003) . 'Flexibility and specificity in coral-algal symbiosis: diversity, ecology, and biogeography of symbiodinium'. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 34 (1) , 661–689.

77. Buddemeier, R.W. and Fautin, D.G. (1993) . 'Coral bleaching as an adaptive mechanism'. BioScience, 43 (5) , 320–326.

78. Jones, A.M. and R. Berkelmans (2011) , 'Tradeoffs to thermal acclimation: Energetics and reproduction of a reef coral with heat tolerant Symbiodinium type-D'. Journal of Marine Biology, 2011, 12. Jones, A.M. and R. Berkelmans (2010) , 'Potential costs of acclimatization to a warmer climate: Growth of a reef coral with heat tolerant vs. sensitive symbiont types'. PLoS ONE, 5 (5) , e10437.

79. Marshall, P.A. and Baird, A.H. (2000) . 'Bleaching of corals on the Great Barrier Reef: differential susceptibilities among taxa'. Coral Reefs, 19 (2) , 155–163.

80. It is possible that many other organisms can change their microbiome in a similar way to adapt to changing temperatures, but little is known.

81. Diaz-Pulido, G., L.J. McCook, S. Dove, et al. (2009) , 'Doom and boom on a resilient reef: Climate change, algal overgrowth and coral recovery'. PLoS ONE, 4 (4) , e5239.

82. <https://scripps.ucsd.edu/news/central-pacific-coral-reef-shows-remarkable-recovery-despitetwo-warm-water-events>.

83. <https://www.npr.org/2022/11/02/1132950728/coral-reef-resurrected-climate-changebleaching-protection-nat-geo>.

84. <https://www.azocleantech.com/news.aspx?newsID=31434>.

85. <https://www.abc.net.au/news/2020-11-06/coral-reef--at-rowley-shoals-recovers-frombleaching/12840302>.
86. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00227-022-04091-2>.
87. Such as the AIMS long term monitoring team.
88. <https://www.newscientist.com/article/mg25433810-400-the-replication-crisis-has-spreadthrough-science-can-it-be-fixed/>.
89. The author cannot recall from whom he copied this apt expression.
90. Photosynthetic corals only. Not counting corals in the rariphotic zone. Almost no data is from deeper than 20 meters.
91. On the GBR.
92. 'Slow growing' meaning it will usually take a minimum of 5–10 years to grow from a newly settled larvae. Some species take far longer.