



for a living planet®

WWF ジャパン
(公財)世界自然保護基金ジャパン
〒108-0073
東京都港区三田 1 丁目 4 番 28 号
三田国際ビル 3F

Tel: 03-3769-1711
Fax: 03-3769-1717
www.wwf.or.jp

陸域の開発が石垣島白保サンゴ礁に及ぼす影響



©Rintaro Suzuki

白保でのリゾートホテル開発計画への懸念

沖縄県石垣島・白保サンゴ礁には南北約 400m、東西約 200m にわたる世界最大規模のアオサンゴ群集が見られます。沖縄県石垣島・白保のサンゴ礁の海。しかし、この海を目の前にした地区で、現在、新たなリゾートホテルの建設が計画されました。この計画が実現すると、貴重なサンゴ礁生態系に悪影響を与えることが強く懸念されるため、WWF ジャパンは 2017 年 12 月、沖縄県に対し開発を許可しないよう要請を行いました。しかし、沖縄県は 2018 年 3 月 28 日に開発を許可しました。その後、白保住民が計画の撤回を求めて訴訟に発展しました。現在、裁判で原告側住民は、ホテルの建設予定地では被告が開発許可を受けた排水処理方法が沖縄県の定める基準で認められていないため、建設は不可能なことから、2019 年 1 月 27 日付で訴えを取り下げる状況になっています。しかし、計画側はホテル建設計画を諦めておらず、新たな

計画が立てられる可能性は否定できません。

この計画地に接する白保サンゴ礁は、昔よりもサンゴが減少しています。2016年夏、海水温の上昇によって、多くのサンゴが白化して死んでしまいました。このサンゴの白化現象は、2007年、1987年にも起き、ほぼ10年のサイクルで発生しています。現在の地球温暖化がさらに進行すると、海水温が上昇しサンゴはさらに減ってしまう可能性もあります。また、このような地球規模の問題に加えて、白保サンゴ礁と隣り合う陸から海へは、常に畑から流れ出す赤土や肥料、生活排水などの様々なストレスがかかっているのです。このように、常に陸からの影響をうけている状態の海に、これ以上のストレスが加わると白保サンゴ礁の環境はさらに悪くなってしまう可能性があります。現在でも陸からのストレスを受けている状態で、さらに年間10万人が宿泊するホテルが完成した場合、その影響が及ぶことが心配されます。

私たちは、白保サンゴ礁にこれ以上のストレスがかかることを避ける必要があります。そのために、これまでに白保サンゴ礁海域や陸域で行われた研究結果を集め、白保サンゴ礁の特徴を踏まえ過去からの状況の変化と、陸から受けるストレスについての資料を作成しました。



陸域に接する白保サンゴ礁の脆弱性について

1. はじめに

2018年度沖縄県の観光客数は999万9,000人で過去最高を記録し、6年連続で過去最高を更新した。また、クルーズ船の寄港回数の増加などを背景に、海外からの観光客数も過去最高の300万人を超え、沖縄県は観光関連の事業を中心に経済動向は好調な状況にある。沖縄の経済を表す指標は観光業界が牽引する形で上昇傾向であることを示しており、この20年間で沖縄の経済状況は大きく変化したことが理解できる。このような状況において、県内の各地で交通イ

ンフラの整備が進められ、また、増加する観光客に対応するため、大小さまざまな規模の宿泊施設の建設や計画が進められている。

沖縄を訪れる多くの観光客が沖縄の島々を囲むサンゴ礁を見渡す景勝地への訪問、ダイビングをはじめとするマリンレジャーの体験やサンゴ礁海域で採集される魚介類を食べるなど、沖縄の島々を囲むサンゴ礁は観光資源として様々な利用がなされている。また、島の周りをサンゴ礁に囲まれているために、台風時の波浪が軽減されるなどの防災面においても島に暮らす人々はサンゴ礁がもたらす生態系サービスを楽しんでいる。その一方で、1974年の沖縄復帰以降、琉球列島のサンゴ礁海域ではオニヒトデの大発生による造礁サンゴ類(以下サンゴ)の被害、開発に伴う陸域からの赤土の流入、海水温が高い状態が継続することによる白化現象によってサンゴが減少しサンゴ礁生態系の衰退が継続している。琉球列島のサンゴ礁は、世界のサンゴ礁の分布域のなかで低緯度地域に発達する周辺域に属し、核心域のサンゴ礁に比べて規模が小さく、陸域に接していることが特徴である(堀 1990)。それ故に、琉球列島のサンゴ礁海域は河川や地下水を介して陸域からの負荷を受けやすい脆弱性を有している。陸域に接するサンゴ礁への陸域からの赤土や栄養塩類の流入も継続し、様々な対策が試みられているものの根本的な保全対策がなされていない状況にある。

このような状況において、現在、沖縄県をはじめとする琉球列島では、観光客の増加に伴う観光施設や宿泊施設の建設計画が各地で進むが、サンゴ礁海域に近い海岸付近における開発がサンゴ礁海域に与える影響が懸念され、石垣島の白保サンゴ礁に接するホテル建設計画では、住民との訴訟問題に発展した。このホテル計画は、年間10万人の宿泊が見込まれ、浄化槽処理をした排水を地下に浸透させる処理を行う方針であり、計画地に接するサンゴ礁海域への影響が懸念される。今後のサンゴ礁の保全対策や持続可能な利用において、どのような対策が必要であるかを検討する際の基礎資料となることを目的とし、陸域からサンゴ礁生態系にかかる負荷について考察する。対象とするサンゴ礁は、これまでに琉球列島の陸域に接するサンゴ礁の中で、多くの研究やモニタリングが成されている沖縄県石垣島の白保サンゴ礁(図1)を対象とし、関連する既往研究の成果を中心に検証する。

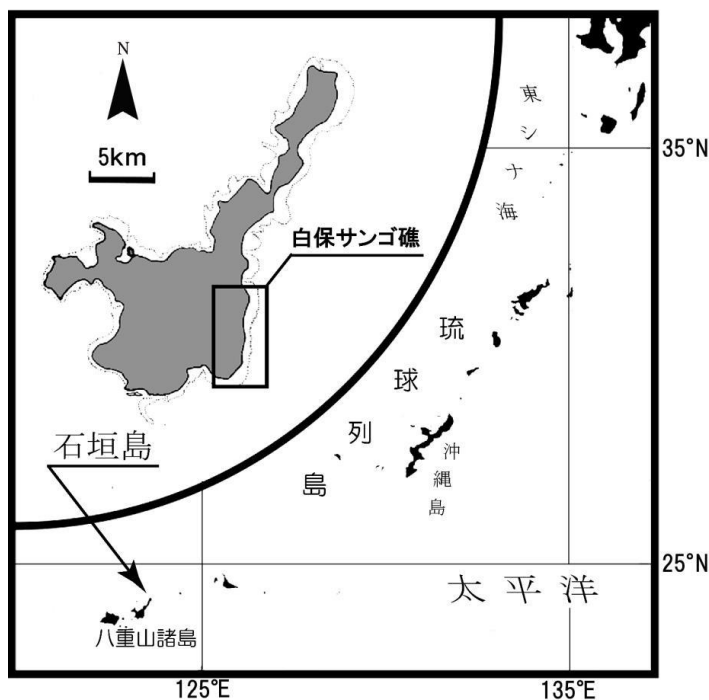


図1. 白保サンゴ礁位置

2. 白保サンゴ礁の概要

白保サンゴ礁は、八重山諸島の石垣島東海岸に位置し、海岸線に沿った連続性の良いサンゴ礁が発達している。白保海岸のサンゴ礁は、浜と並行した礁嶺が沖に発達し、波が立つ礁縁までの距離が、広い場所で 800m の幅を持つ。礁嶺と汀線の間には、深さ 1–3m を有する礁池があり、礁嶺によって外洋側と区分される。礁池は礁嶺によって外洋からの波が遮られるため、礁池内は外洋側と比較して穏やかな海域となっている。また礁池内には浜と直交する方向に礁嶺まで続く「ワタンジ」と呼ばれる高まりが存在し、ワタンジに囲まれた海域を「クムイ」と呼ぶ(図 2)。石垣島東海岸における礁池と外洋は、連続性の良い礁嶺によって区切られているが、この礁嶺にはいくつかの「クチ」と呼ばれる切れ目が存在する。白保周辺では、南のミヤラグチから北のツールグチと呼ばれる深い切れ目の他に、浅いブーグチ、モリヤマグチ、スムジグチ(イカグチ)の三つの切れ目があるが、極めて連続性の良い一連のサンゴ礁が存在する(目崎・渡久地 1991)。この海域は 2007 年 8 月 1 日に、石垣島の一部は西表国立公園に編入され、西白保地区沿岸 311.6ha のサンゴ礁海域が白保海域公園地区に指定されるとともに、隣接する白保海岸(24ha)が第 2 種特別区域に指定されている。本論における白保サンゴ礁は、北のモリグチから南の白保集落前までの範囲を白保サンゴ礁とし、検討の対象とする(図 3)。

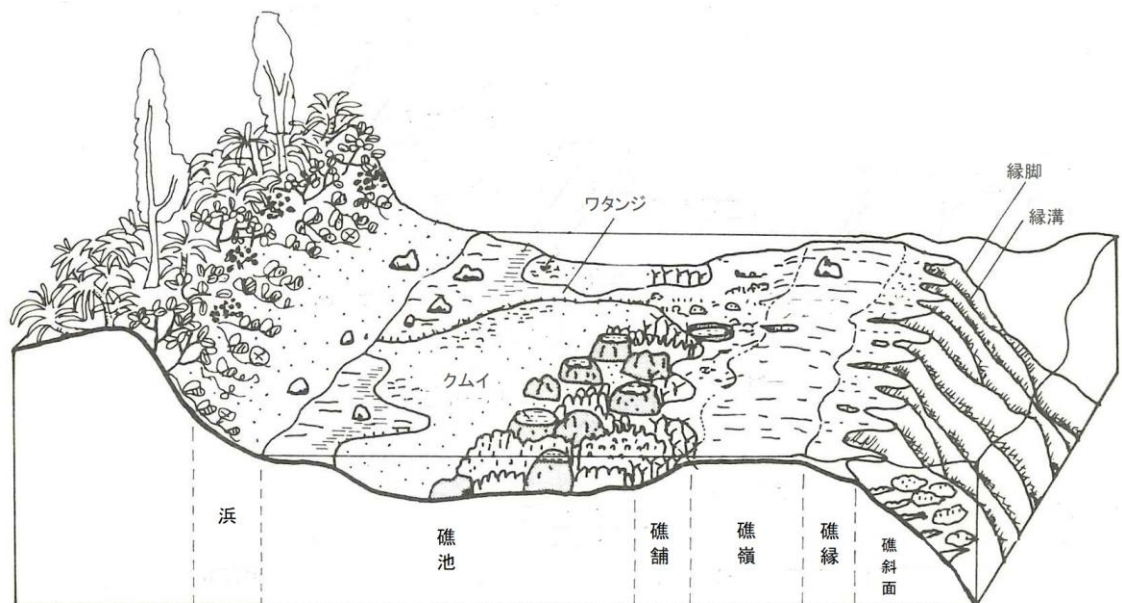


図 2. 白保サンゴ礁構造図 (目崎・渡久地 1991 を一部改変)



図 4. 白保サンゴ礁海域と海域に接する陸域

白保サンゴ礁内の礁池や礁斜面では数多くのサンゴが生息し、石垣島周辺では 363 種の造礁サンゴが確認されている(西平・Veron1995)。外洋側の礁斜面では、波浪への対抗性を有するサンゴが多く生育する。一方、礁嶺より内側の礁池では、外洋からの波浪の影響を受けにくいいため、外洋とは異なる葉状や枝状のサンゴが見られる。白保サンゴ礁に分布するサンゴは、一様に分布せず、局所的に生息するサンゴが多い場所が認められる(鈴木ほか 2012)。サンゴの棲息が多く見られる場所では、サンゴを観察するための観光遊覧船や、シュノーケリングを行うツアーなどの観光業の場としても利用されている(長谷川・山野 2004)。観光遊覧船が使用する場所は、主にサンゴが多く棲息する 2 か所の海域である。そのうちの 1 か所は、大規模なアオサンゴ(*Heliopora coerulea*)の群集が存在し、世界的に見ても大きな群集とされる(長谷川・山野 2004)。鈴木ほか(2011a)は、そのうちの 1 か所であるアオサンゴ群集が棲息する海域について、その分布状況を調査した。調査の結果、アオサンゴ群集が分布する範囲は南北方向に約 400m、幅 200m の範囲であり、特にアオサンゴ群集の分布が集中する範囲の面積は 26,177 m²であった。アオサンゴが優占種として生息している範囲の被覆率は平均 53%であった。もう一方の海域は、現地で「フタナガクムイ」と呼ばれる場所で、大型のハマサンゴ群体、ミドリイシ属、コモンサンゴ属、シコロサンゴ属、ハナヤサイサンゴ属、キクメイシ属などをはじめとする多様なサンゴが棲息する海域である(鈴木ほか 2011b)。上記に海域以外では、生きたサンゴの分布は見られるが、被度が高い場所は少ない。

3. 白保サンゴ礁のサンゴ群集の変遷

白保サンゴ礁は、石垣島東海岸に連続するサンゴ礁の中においては、サンゴが多く生息する海域である。しかし白保サンゴ礁のサンゴは過去よりも減少したことが、複数の調査から明らかとなっている。WWF ジャパンは、1989 年、1994 年、1999 年に石垣島周囲のサンゴ礁において、サンゴの生育状況について調査を実施した。このなかで、白保海域ではフタナガクミイ、轟川河口とモリヤマグチの間に位置するポールⅢと呼ばれる二地点で調査が行われている。その結果、フタナガクミイでは 1984 年に海底を生きたサンゴが覆う被度が 50～70%のランク 5 に相当、1994 年には 10～25%のランク 3、1999 年は 25～50%のランク 4 であった。ポールⅢでは、それぞれ、ランク 5、ランク 1、ランク 4 の結果であり、1989 年よりも 10 年間でサンゴの被度は減少傾向にあった(前川 2005)。さらに、WWF サンゴ礁保護研究センターでは、2002 年より白保サンゴ礁のフタナガクミイの海域において測線調査を 2010 年まで実施した。その結果によるとサンゴの被度は、調査を開始した 2002 年に被度が 26%あったものが、2004 年には 9%にまで減少し、その後緩やかな減少傾向が 2010 年まで続いた。このように、白保サンゴ礁海域のサンゴは、過去よりも減少していることがこれらの調査結果から把握する事ができる。その後、2018 年に再びフタナガクミイにおいてサンゴの被度調査を実施した結果、造礁サンゴのサンゴ被度が 11.9%であり 2010 年まで続いていた減少傾向は止まり、サンゴの被度は若干増加した。結果として、現在の白保サンゴ礁のサンゴは 1980 年代よりも減少し続けたが、現在はその減少傾向は下げ止まり、ある一定のレベルで推移していると考えられる。

サンゴが減少する原因は複数挙げられるが、サンゴの生育にとって大きく影響を受ける要因として、大型の台風や海水温の上昇による白化現象等が挙げられる。この中で過去に起きた複数回の白化現象は、白保サンゴ礁にとって大きな影響をもたらした。白保サンゴ礁をふくむ南西諸島、および世界のサンゴ礁海域は 1998 年、2007 年、2016 年に白化現象が確認された。これ以前にも、琉球列島では造礁サンゴ類の白化現象が報告されているが(Yamazato1981, 亀崎・宇井 1984)、近年はほぼ 10 年ごとに広域の白化現象が生じている状況である。白化とは、造礁サンゴが環境ストレスにより褐虫藻を失い、透明なサンゴ組織を通して白い骨格が透けて見える現象である(日高 2006)。さまざまな環境ストレスの中でも、高海水温が持続する場合、海水温ほぼ 30℃が白化の起こる臨界温度と考えられており、わずかに 1℃高くなっただけで個体によって白化が起こる(西平・Veron1995)。さらに、造礁サンゴ類が白化を起こす環境ストレスは、光(紫外線ストレス等)、温度(高温/低温ストレス)、塩分濃度、堆積物、干出、高栄養塩、農薬、細菌感染など様々な要因があげられる(中村ほか 2006)。八重山諸島石垣島の東海岸に位置する白保サンゴ礁海域では、夏季の高温時、外海と閉ざされる礁池の水温は高く上昇する。実際、白化現象が見られた 2016 年の夏、白保サンゴ礁内の推進 3m に設置した水温計の記録では、7 月平均水温が 30.3℃、最高水温が 32.5℃であり、30℃を超える時間が 7 月を通じ 438/744 時間であった。さらに 8 月では同地点で平均水温が 30.8℃、最高水温が 33.2℃、8 月を通じて 30℃を超える時間は 668/744 時間であった(鈴木 2017)。これにより、7 月上旬に白保礁池内で浅い場所のミドリイシやトゲサンゴの白化が認められ、8 月 10 日には白保礁池内(フタナガクミイ)で 35～45%の白化率 8 月 22 日には同地点で 40～55%の白化率、そのうち 20%が死亡している状況を観察した。一方、アオサンゴ群集が発達する海域では、アオサンゴやユビエダハマサンゴの白化は認められなかった。茅根ほか(1999)も、白保サンゴ礁において 1998 年の白化現象前後の造礁サンゴの状況について調査し、枝状コモンサンゴ類、枝状ミドリイシ類、枝状ハマサンゴ類が白化率・へい死率ともに高く、塊状ハマサンゴ類は白化率が高いがへい死率が低いことを明らかにし、2016 年時の白化現象についてもアオサンゴは白化率・へい死率ともに低い状況であった(鈴木 2017)。また、アオサンゴ群集の海域については、2006 年と 2011 年に鈴木ほか(2014)が調査を実施している。その結果、2006 年と比較して 2011 年は、全体的にアオサンゴ群

集海域の他のサンゴも含むサンゴ被度は低下したが、アオサンゴの被度の低下は認められなかった。

このように、白保サンゴ礁は過去に多種のサンゴが生息していたが、白化現象が起こるたびにサンゴが死亡する状況が確認されてきた。また、全体的にもサンゴの被度は減少傾向にある状況であったことが理解できる。一方で、大規模なアオサンゴ群集は周囲のサンゴが減少する中、白化現象も起きず継続して群集が維持されている。

4. 地形構造による閉鎖的環境

白保サンゴ礁では、過去に夏季における高水温によるサンゴの白化現象が生じ、多くのサンゴが死亡する状況が確認されてきた。この白化現象は太平洋全域で海水温が上昇したことが原因だが、白保サンゴ礁はサンゴ礁地形の形態的な特徴により閉鎖的な環境になり易く海水温が特に上昇しやすい環境にある。白保サンゴ礁は沖合に連続性の良い礁嶺が発達し、外洋側からの波浪を遮るために礁嶺を境として外洋側と陸側で海域の環境が大きく異なる。また、潮汐による干満により海面が高い時間と低い時間が約6時間周期で連続的に繰り返される。満潮時は、礁嶺を超えて外洋からの海水が流入し、流入した海水は「クチ」と呼ばれる礁嶺の切れ目から外洋に流出する。例外として大潮-中潮にかけての潮位変動が大きい干潮から上げ潮に向かう数時間程度の間は、クチを通じて外洋からの海水がリーフ内に流入してくる急激な流向変化が生じることを灘岡ら(2000)が指摘するが、恒常的に礁嶺を超えた海水はクチを介して外洋に流れ出る。一方で中潮位より潮位が低くなる干潮時では礁嶺が干出する。この時間は外洋からの波を礁嶺が遮ることにより、陸側の礁池は波浪の影響を受けない穏やかな状況になるとともに、外洋からの海水の進入がなくなる。この干潮時は礁池内の潮流は、河口の北に位置するリーフの切れ目、「モリヤマグチ」から外洋側に海水が流出する流れが確認されている(田村他 2003)。しかし、轟川河口より南側の海域、特にアオサンゴ群集が発達する海域では、干潮時における海水の流れは認められない。これは、アオサンゴ群集の南側に存在する「クシキヌワタンジ」、北側には「オオクムイヌワタンジ」と「マシマワタンジ」呼ばれる、海岸線と並行に発達する礁嶺と直交する形の高まりが存在しているために海水の流動が遮られる(図4)。特に南側のクシキヌワタンジは、干潮時に広範囲に干出する。そのため、白保サンゴ礁は干潮時には外洋からの海水の供給が干出した礁嶺に遮られ、礁池では海岸線と直交するワタンジの高まりによって海水の流動が阻まれ、ほとんど潮流が無い穏やかな環境が形成される。このように、外洋側と礁池側での水の循環は、地形的な制約と潮位により閉鎖的な海域となる。

この白保サンゴ礁における地形構造は、海水の流動に制約を与えているのみでなく、生物分布などの環境を区切っている。中井(2007a)は与論の裾礁タイプのサンゴ礁を例に、サンゴ礁裾礁における空間構造把握のためには、礁原上の地形的な境界と物質移動系で隣接する他地域と区分さえる自然地理的ユニットの設定が必要であることを示した。このユニットは、裾礁タイプのサンゴ礁のように海岸線と並行する微地形の帯状構造に加え、海岸線と垂直方向に発達する高まり等によって海水の動きから設定された空間であり、無機環境系の空間構造でありながらも、生物分布や生態系全体の空間構造の把握が可能となる空間構造であると述べている。白保のサンゴ礁においても、外洋側に連続性の良い礁嶺が発達する事に加え、汀線と直行する高まりが存在する事から、潮流が循環するユニットが設定可能であり、特にアオサンゴ群集が発達する場所の南側の「クシキヌワタンジ」と北側の「マシマクムイワタンジ」間是一个のユニットとして区切る事ができ、海洋保護区を考えるうえでコアゾーンに成る事を示している(中井 2007b)。このように、白保サンゴ礁では沖の礁嶺と海岸線と直交する高まりが存在する地形構造により、干潮時に閉鎖的環境が形成される。



図 4. 白保サンゴ礁におけるアオサンゴ群集とワタンジの位置図

5. 白保サンゴ礁地形とアオサンゴ群集の分布

白保サンゴ礁は、潮流や生物の分布がサンゴ礁地形の高まりによって区切られる。実際白保サンゴ礁では、アオサンゴの分布はほかのサンゴ群集に比べて広域的ではあるが連続性があり、他の海域では同様の分布は見られない。ここでは、アオサンゴの生態的特徴と白保サンゴ礁地形の特徴から、白保サンゴ礁環境とアオサンゴ群集の成り立ちを検証する。

アオサンゴは、アオサンゴ目、アオサンゴ科、アオサンゴ属の1属1種のサンゴである。種の分布域は広く、インド太平洋のサンゴ礁地域では一般的に見ることができる。茅根ほか(2001)は、白保サンゴ礁海域において礁舗から礁嶺にかけてボーリングをおこなった結果、礁嶺より礁池側では150 cmの厚さでアオサンゴの骨格が堆積し、外洋方向に向かって薄くなることを明らかにした。また、アオサンゴの層の下は、塊状ハマサンゴとその他の生物遺骸片が存在することから、現在のアオサンゴ群集は礁嶺が完成した後、浜側に礁原が発達していく過程において、アオサンゴ群集が形成される条件が整い、アオサンゴ群集は現在の礁舗を形成しながら集中した群集を形成したと考えられる。この群集の形成は、アオサンゴの生態的特徴によるものと考えられる。造礁サンゴ類の繁殖様式は極めて多様であることが知られ、基本的には体内受精による幼生保育型、放卵放精型、体外受精型に大別される。サンゴはそれぞれに雌雄同体性のものと雌雄異体性のものがあるが、アオサンゴは雌雄異体の幼生保育型であり、幼生は放出された後しばらく群体上に止まっていることが知られる(西平・Veron 1995)。Harri et al.(2003)は、白保サンゴ礁においてアオサンゴとハナヤサイサンゴの幼生の行動について比較をおこない、アオサンゴの幼生は親から放出された47%の幼生が6時間以内に着床し、他のサンゴよりも短時間である点や、幼生内の脂質の量が少ないために浮力に乏しく海底に溜りやすいことを示した。このことから、アオサンゴの幼生は遊泳能力が乏しく、幼生が親群体から遠く離れた場所に拡散しないことを明らかにした。そのため、アオサンゴは大規模な群集を形成し易く、親群体からの幼生の加入によってその群集規模が保たれていると考えられる。アオサンゴ群集が集中する場所では、狭い範囲内におけるアオサンゴの割合が80%を越え、他のサンゴ類は見られない場所もあるが、これはアオサンゴ群体が無性生殖によって群体を拡大することに加え、幼生の遊泳能力が低いことが、単一種による群集を形成する一要因となることを示すものである。

この生態的特徴に加え白保サンゴ礁海域のサンゴ礁地形も、アオサンゴ群集が集中する要因となっている。白保サンゴ礁の礁池内の潮流は、外洋側の波が礁嶺を乗り越えて流入し礁池を通じて礁嶺の切れ目から外洋に流れる。石垣島東海岸では、卓越風高が冬は北-北東、夏は南と変化するため、風向に影響された海水流動パターンを示すが、年間を通じては北風が卓越するため、卓越流は北風時のものと考えられている(Yamano et al. 1998)。アオサンゴ群集付近の海域では、東側の外洋側から礁嶺を乗り越えた海水が流入し、その一部は礁池内で北から南に向かう流れとなる。その流れはアオサンゴ群集の南側に存在するクシキヌワタンジの高まりに阻まれ、東側の礁嶺の切れ目であるブーグチから外洋に流れ出す。そのため、アオサンゴ群集が集中する場所の海水の流れは、外洋側から流入した海水がすぐに南側の切れ目を通じて外洋方向に流れ出すために周囲の礁池内にアオサンゴ群集が拡散しない状況が形成されている。また、調査海域では低潮位時には、礁池の沖側に発達する明瞭な礁嶺によって外洋と遮断される停留現象が起こる(Nakamori et al. 1992, Kayanne et al. 1995)。そのため、礁池内の潮流は留まる状況となり、より閉鎖的な環境が生じる。アオサンゴは生息する環境が閉鎖的であることに加え、幼生の遊泳能力が低いことが群集を局所的にしている要因としてあげられる。さらに、調査範囲内において、北側と比較し南側にアオサンゴ群集が集中する点においても、礁池内の潮流が群集の形成に影響を与えている可能性を示唆するものである。

白保サンゴ礁のような閉鎖的な海域は、夏季に礁池の海水温が高温になりやすい。これまで

に白保サンゴ礁では、夏季の高水温によりサンゴの白化現象が起きたが、アオサンゴが白化することは無かった。2006 年と 2011 年に実施したアオサンゴ群集の分布調査結果を比較すると、2011 年は全体的にアオサンゴ群集海域の他のサンゴも含むサンゴ被度は 2006 年より低下したが、アオサンゴの被度の低下は認められなかった。また、アオサンゴ以外のサンゴが減少したため海域におけるサンゴの多様性が減少した。これは、2007 年に生じた夏季の高水温による白化現象により、白化しやすいサンゴが減少し、高温耐性が高いアオサンゴが生き残った結果と考えられる(鈴木 2017)。これは、白保サンゴ礁海域に生息するアオサンゴが、特に高水温の耐性があるタイプであることによると考えられる。アオサンゴは、集団遺伝解析・系統解析により遺伝的に異なる 2 つの遺伝系統をもつ A タイプと B タイプの存在が黒潮海域において存在し、白保に生息するアオサンゴは、タイプ B であることが確認されている(Yasuda et al. 2014, 2015)。谷中ほか(2018)は、その違いが不明であることに着目し、2 タイプの生殖時期の違いについて比較を行った。その結果、アオサンゴの A タイプ、B タイプの遺伝的に異なるアオサンゴについて、水温計を設置した水温環境の大きく異なる場所でそれぞれ A タイプと B タイプが棲み分けをするかのように、異なる場所に分布することから、2 タイプの生息に最適な水温環境は異なっていると考えられた。B タイプのみが生息する場所は、A タイプの生息が確認できる場所よりも最高水温が高く(34℃ vs 31℃)、B タイプの方がより高温耐性を持つ可能性がある事を示した。三方を高まりで囲まれた白保礁池のアオサンゴ群集が棲息する海域は夏季に高温の状況になりやすい。多くのサンゴにとって生息が難しい環境においてアオサンゴ群集が卓越する理由は、白保に生息するアオサンゴが特に高温に対する耐性が強い B タイプであることが、白保海域において広範囲に群集を形成する要因の一つと考えられる。このようにアオサンゴ群集の分布がこの海域に集中する要因は、アオサンゴの幼生が拡散しにくい点と高水温の耐性を有するタイプが生息するという生態的特徴に加え、白保サンゴ礁の地形的特徴による礁池内の潮流によるものと考えられる(鈴木ほか 2011a)。

6. 陸域に接するサンゴ礁生態系の脆弱性

サンゴ礁におけるサンゴの増減は、サンゴ礁に暮らす多くの生き物に影響を与える。Sano et.al.(1987)は、長い樹状のミドリイシが生きて海底を覆っているサンゴ礁と、樹状ミドリイシがオニヒトデに食べられて死んでしまい形が崩れたサンゴ骨格とで、出現する魚の種数と固体数を比較した。その結果、サンゴが死んで崩れてしまうと、魚の種数はサンゴが生きている状態の 1/3 程度、個体数は 1/10 程度に減少することを明らかにした。このようにサンゴが形成するサンゴ群集は、魚類やほかの生物にも棲み場所や食物を与えており、サンゴの群集の変化は、サンゴ礁生態系全体の変化を及ぼすことから非常に重要な存在と捉えられている。また、サンゴ礁生態系はサンゴの盛衰に強く影響されることから、サンゴ礁生態系はサンゴが減少することによりと衰退する脆弱性を有している。ここでは、陸域に接する白保サンゴ礁においてサンゴが減少する要因について検討する。

サンゴは、共生する藻類が光合成可能な光量、適度な水温、海水中であることが生息条件である。一部のサンゴを除きほとんどのサンゴは海底に固着して生活しているため、棲息している環境が悪化し、生息条件が一つでも外れると場から移動することが出来ずに死滅する。特に水温の変化に影響を受けやすく、水温が高すぎても低すぎても白化現象を引き起こす。これらの生息条件に加え、一般的に海洋では、植物プランクトンの光合成に必要な栄養塩は、深層の水に豊富に含まれている。サンゴ礁が発達する低緯度の海域では、強い日射によって表層の水が温められるため、深層に存在する水との温度差が大きくなるため、表層と深層の水が混ざり難くなり、栄養塩を含んだ深層の水を海面近くに運ぶ垂直方向の流れが発生しない。このよう

に、サンゴ礁が発達する海域の表層では、貧栄養の世界が保たれるため、植物プランクトンの量は年間を通して低く保たれている(Lalli and Parsons,1993)。このような条件により、サンゴ礁が発達する海域は、基本的に貧栄養の世界である。元来サンゴは貧栄養の環境を好み、富栄養の環境には適さないことからサンゴ礁海域は栄養塩類が少ない貧栄養の状況であることも重要である。

石垣島をはじめとする琉球列島のサンゴ礁は、世界のサンゴ礁分布をみると低緯度地域を中心とした核心域のサンゴ礁に比べ、サンゴ礁の規模は小さい。また、グレートバリアリーフのように規模が大きいサンゴ礁では、陸からサンゴ礁までの距離が数百キロメートルも離れていることに対し、琉球列島のサンゴ礁は陸域に接する裾礁タイプのサンゴ礁であるため、陸域からの影響を受けやすいという特徴を有している。また、琉球列島の土壌は主に赤い色をした「赤土」と呼ばれる土壌に覆われている。これが河川等を通じてサンゴ礁海域に流入するとサンゴ礁生態系に大きなダメージを与える。石垣島は沖縄県最高峰の於茂登岳を有する島で、複数の河川が陸域からサンゴ礁へと流れ、白保サンゴ礁は北側に轟川、南側の海岸を回り込んだ西南側に宮良川がサンゴ礁海域へと流れ込んでいる(図 3)。両河川とも流域にサトウキビや牧草地を中心とした耕作地が広がり、降雨時には明瞭な河川を通じた海域への赤土流出が認められる。沖縄の島々の周辺に発達した礁池は閉鎖的で、流出してきた土壌はここに沈殿しやすい。これは台風接近などで波が高くなると再び舞い上がって海に懸濁する。このため赤土汚染は大雨時のみの一過性のものではなく、慢性的に沿岸を蝕んでいるといえる(大見謝 1995)。

陸域の変化は、サンゴ礁海域の変化と同調する報告もある。長谷川(2011)は、リモートセンシングデータを用い、白保サンゴ礁と白保サンゴ礁に流入する轟川流域において、長期間にわたる陸域とサンゴ礁の変化を時間的・空間的なデータに基づいて解析してその関係性を明らかにしようと試み、陸域の開発に伴って変化したサンゴ礁環境の例をまとめた。その結果、石垣島で土地改良事業が始まった 1970 年代以降、轟川流域では水田の減少とサトウキビ畑の増加、区画整理に伴う直線的な農地境界の出現と農地の分断が生じた。さらに土地改良事業は土地利用形態の変化だけではなく、土地改変に伴う加速的な土壌侵食の進行ももたらし、流出した赤土が白保サンゴ礁浅海域のサンゴなどの死滅をもたらしたことを示した。また、陸域の変化がサンゴ礁に及ぼした影響について、白保のサンゴ礁浅海域の海草藻場の変化を指標に分析した結果、1972 年にサンゴ礁海域の 1.2%を占めるにすぎなかった海草藻場が、2004 年には 7.5%まで拡大していることが明らかとなった。この海草藻場の拡大は、赤土流出に伴って耕地からリン、窒素などの化学肥料の成分や肉用牛飼育による未処理の排泄物が浅海域に流れ込み、この影響で海草・海藻類が過度に成長し、分布域を拡大させたことが原因であると推測している。このような変化は石垣島のみならず他のサンゴ礁を有する島においても確認されている。鹿児島県の与論島では 1994 年以降 6 年間でサンゴ礁浅海域における海草藻場の拡大が確認された。この原因として、仔牛農家の急激な拡大に伴う海域の富栄養化が可能性の一つとして挙げられている(中井 2005)。与論島は石垣島と異なり明瞭な河川が存在しないことから、これら栄養塩類のサンゴ礁への流入は、陸域からのサンゴ礁海域へ地下水を介して流入していると考えられる。このように、サンゴの生育環境は、サンゴ礁と接する陸域からの影響を強く受ける。特に栄養塩と赤土は、サンゴ礁環境に強い影響を与え続けていることから、サンゴ礁生態系はこの 2 つの要因に対して脆弱性を有している。

また、サンゴ礁がもたらす生態系サービスの分野は多岐に及ぶ。そのうち、美しいサンゴ礁の景観は、癒しや観光資源として高い価値を有している。石西礁湖や各島の周囲に発達するサンゴ礁海域へ観光の場として多くの人が訪れる、またサンゴ礁海域に関わる観光業に従事する人も多い。石垣島を中心とする八重山地域には、観光客が 2017 年に年間 137 万 9 千人が訪れている。30 年前の 1987 年(30 万 9 千人であったことから、この 30 年間で約 100 万人増加している。陸域に近接するサンゴ礁が発達する石垣島では、石垣島では、国立公園に指定されて

いる米原海岸で遊泳客によるサンゴの踏み荒らしやクマノミの違法採取などの行為が問題となり、2019年7月に米原海岸利用ルールの試験運用が開始された(環境省 2019)。この他にも、遊泳禁止の場所で海外からの観光客が海水浴を行って問題になるなど、観光客の増加に伴うオーバーユースの問題やサンゴ礁生態系にかかる負荷は増加する傾向が認められる。このようなサンゴ礁の利用も、サンゴ礁が有する脆弱性と認識する必要がある。このように、サンゴ礁生態系は赤土と栄養塩の陸域からの流入、また観光利用による影響を受ける。以下に白保サンゴ礁におけるそれぞれの負荷がサンゴ礁生態系に及ぶ影響について考察する。

6-1. 白保サンゴ礁海域への赤土の流入

白保サンゴ礁の北側に流入する轟川流域では、圃場整備や河川改修などを目的とする土地改良事業が進められ、1979年から1989年までに319haの圃場整備と、1981年から1989年までに延長6.4kmの河川改修が行われた。この轟川では、降雨後にしばしば濁りが発生するが、濁りの原因となる土砂の流出源は圃場整備域が最も多く、河川改修箇所がこれに次ぐ。両事業の進展状況から、轟川への土砂負荷は1983-84年以降激化したと考えられる(大垣・野池 1992)。また、宮良川流域についても同時期に宮良川土地改良事業が実施されていることから、宮良川からも圃場整備域と河川改修による赤土流出が多い。大見謝(1996)は、沖縄県内の赤土の堆積状況と造礁サンゴの被度を比較し、赤土の堆積とサンゴの被度は関係性が高いこと、サンゴは科や属が同じでもその形状によって赤土堆積への耐性が大きく異なること、一般に樹枝状サンゴは赤土堆積への耐性が弱く塊状サンゴは耐性が強い傾向が見られること等を指摘した。また、金城ほか(2005)は、沖縄県が実施している海域における赤土堆積評価の手法、底質中懸濁物質含量簡易測定法(SPSS 測定法)で計測された値を用い、赤土堆積状況の推移と堆積がサンゴの被度や成長にどのような影響があるかを報告した。この報告では、石垣島の宮良川河口と轟川河口も調査対象地点となっている。それによると、宮良川河口域では、2002年からサンゴ被度が減少し、2003年の調査においてミドリイシ類のサンゴの死滅が確認された。調査が実施された期間中、SPSS 値はランク 7~8 と高い状態で推移し、赤土堆積の影響を強く受けているが、新規のサンゴ群体やサンゴの成長も確認できことから、赤土の流出が抑えられれば、高被度のサンゴ群落を形成する可能性が高いと指摘している。また、中曽根ほか(2001)は轟川の水質を分析した結果、赤土以外にも栄養塩や有機物等の河川流入物の影響を強く受けると考えられると報告している。このように、赤土が多く堆積する海域では、サンゴ群集の被度の被度との関係が指摘されている。さらに、サンゴ群集への影響のみではなく、赤土による懸濁と堆積は、サンゴの幼生がサンゴ礁の海底への着床が阻害され(波利井・灘岡 2005)、新規のサンゴ幼生の加入を妨げる原因とも指摘されている。

WWF 白保サンゴ礁保護研究センターでは、白保サンゴ礁海域の赤土堆積状況を2000年から2013年まで実施している(WWF ジャパン HP)。その後、地域の活動を行なうNPO 法人夏花が継続して現在まで調査を継続している(夏花 HP)。その結果、2000年に開始された当時、轟川河口の値はランク 7~8、アオサンゴ群集付近でも浜側ではランク 6 を記録する高い状態であり、白保サンゴ礁全域に赤土の堆積が認められる状況であった。その後、一時的な増減はあるものの、轟川河口ではランク 6~7、アオサンゴ群集の近くではおおそランク 3~5b の範囲内で推移している。また、干潮時、外洋側が礁池より水位が低い状態となると、轟川の北に位置するモリヤマグチから外洋側に海水が出て行く(田村他 2003)。そのため、轟川から流入した赤土は、河口からモリヤマグチに向けて流れる。NPO 法人夏花による赤土堆積調査では、轟川河口からモリヤマグチ間の礁池では、赤土の堆積量が多い結果を示している。このことから、轟川より流入する赤土は、主に河口より北側に運搬されて堆積するため、河口より南側では北側と比較し

て流入量が少ないものと考えられる。これは、轟川の河川水が北側に流れるだけでなく、前述した通りアオサンゴ付近の海域が地形的に閉鎖的な環境であることも、赤土の堆積量が少ない一要因として挙げられる。しかし、石垣島東海岸では、卓越風高が冬は北―北東、夏は南と変化するため、風向に影響された海水流動パターンを示すが、年間を通じては北風が卓越するため卓越流は北風時のものと考えられている(Yamano et al. 1998)ことから、吹送流によって赤土が白保サンゴ礁海域の南側に流れる場合がある。状況が現地で確認されていることから、降雨量や季節によってはアオサンゴ群集付近にも赤土が流入する状況も考えられることから、轟川河口付近ほどではないが3～5ランクの赤土堆積があるものと推察される。

これらの点から白保のサンゴ礁は、サンゴ礁と接する陸域から河川を通じて赤土の流入が継続的に生じている状況にあり、特に1972年の沖縄復帰以降に主に圃場整備の影響でその量が増大した。また各調査の結果から、現在も赤土の堆積が継続している状況であることが理解できる。このように、白保サンゴ礁海域は陸域に接し、南北に赤土が流入する経路となる河川が存在するという脆弱性を有することから、陸域から河川を通じた土砂の赤土の流入によるサンゴ礁生態系への負荷がかかりやすい海域であると考えられる。

6-2. 栄養塩の流入

サンゴが生育する海域の栄養塩濃度が高くなった場合、そこに生息するサンゴの生育に影響が及ぶ。金城ほか(2006)は、沖縄島・宮古島・石垣島の沿岸域において、栄養塩濃度(全窒素、全リン)を測定した。その結果、栄養塩濃度が上昇するとミドリイシ属のような造礁サンゴ類は減少傾向を示し、替わって海藻類が増加する傾向を示した。また、金城(2017)は今後数値が修正される可能性を踏まえながらも、2009年以降沖縄県内各地における栄養塩のモニタリング調査の結果から、栄養塩濃度、濁度、および水平透明度とサンゴ生育状況の解析結果から、サンゴ被度が50%以上となるために必要な各水質項目の値はそれぞれ全窒素で0.008mg/l以下、全リンで0.01mg/l以下、濁度で0.11度以下、水平透明度で14.0m以上となる事を示した。さらに下田ほか(1988)も、健全なサンゴ礁海域の数値は、全窒素0.06mg/l、全リンで0.007mg/lであることを示している。なお、生サンゴ被度の評価については環境省(2009)が、スポットチェック法でのサンゴ生息状況モニタリングにおいて、生サンゴ被度を用いてサンゴ礁状態を評価しており、「良」以上と評価されるのがサンゴ被度で50%以上とされる。このように、元々貧栄養の状況であるサンゴ礁海域の海では、栄養塩がサンゴの生育に大きな影響を与える。河川を有する琉球列島の島では、陸域から流入する河川水および赤土に耕作地等から流出する栄養塩類が含まれている場合が多い。白保サンゴ礁海域にける陸域からの栄養塩の流入は、河川からの流入と地下水を介した流入が存在する。仲宗根ほか(2001)は、轟川におけるSSと栄養塩について調べ、轟川から白保礁池へ流入する各成分の年間負荷量の推算値はSS 2,240t/年、全窒素71.5t/年および全リン6.6t/年であることを示した。また、坂西ほか(2007)は宮良川流域における濁度性土壌、窒素及びリンの推定流出量を推定し、SS：1,882t/年、窒素：68t/年、リン：7t/年の値を示した。これら河川からの栄養塩の流入は、赤土と同様に白保サンゴ礁内に流れ込む。この栄養塩は赤土と異なり、地下水からもサンゴ礁へと流出している。神田ほか(2010)は陸域における人為的な窒素投入がなされている農業流域である石垣島の名蔵川流域を対象として、地下水による河川への窒素流出について検討した。その結果、陸域、河川地下、河川表層の水質の比較によれば、陸域から河川地下へと陸域の地下水面の空間的広がりに応じた地下水の浸透が生じており、河川地下から河川表層へと河川の水面勾配に応じた地下水の流出が生じていることを明らかにした。これは陸域を発生源とする栄養塩類が、表流水のみならず浸透した地下水を介して河川およびサンゴ礁海域へ流入することを示唆するものである。白保サンゴ礁に流

れ込む轟川においても、金城ほか(2006)が分析した轟川における栄養塩の値は、窒素が 3.8mg/l、リンが 0.05mg/l と高く、TN/TP 比は 76 と地下水の数値に近いことから、轟川が地下水の影響を強く受けていることを示唆している。このように、白保サンゴ礁では、陸域を起源とする栄養塩は、表流水に加え地下水を介してサンゴ礁海域に流入する。

陸域からサンゴ礁海域への栄養塩の影響は、河川がない島においてその影響が指摘されている。奄美群島の最南端に位置する与論島は、隆起石灰岩で構成される河川のない島である。この与論島の東海岸には白保サンゴ礁と同様の連続性の良い裾礁タイプのサンゴ礁が発達し、干潮時は沖側の礁嶺で外洋と遮られて閉鎖的な環境になる点が白保の海域と類似している。この与論島のサンゴ礁環境について、1993年に当時の環境庁が実施した第4回自然環境保全基礎調査の海域生物環境調査報告書(1994)によると、「与論島のサンゴ礁は奄美群島では最大の礁池を有し、かつては枝状ミドリイシの群集が広がっていたと思われるが、調査時点では未だに回復は不良である。北岸の寺崎に被度 IV の枝状ミドリイシの 35.2ha の分布が見られるが、百合ヶ浜を中心として被度(+)の場所が 776.8ha あり、これは与論島のサンゴ群集 1,121.4ha の 69.2% を占める。また百合ヶ浜は「塊状のハマサンゴが点在する」と記載されており、1992年頃まで与論島の東海岸の礁池内ではサンゴが生息していたことが確認できる。しかし、現在この海域では当時のようなサンゴの生息を確認することはできない。1990年代まで確認されていたサンゴが減少した原因は、1998年の大規模なサンゴの白化現象の影響もあるが、白化現象が終了後もサンゴの回復が見られない状況は、与論島の陸域と接する礁池の環境がサンゴの再生・生育が不可能な状況であること意味する。明瞭な河川がない与論島では、陸域へ降った雨は表流水として海に達するほか、石灰岩質の地下に浸透する。浸透した地下水は、海岸線やサンゴ礁内で湧水として流れ出すため、与論島のサンゴ礁は陸域からの影響を、地下水を通じて受けている状況にあると考えられる。中西(2002)は、与論島同様に明瞭な河川がない宮古島において、地下水へ窒素負荷を与える主要な排出源として化学肥料、家畜ふん尿、生活排水の3要因を指摘している。与論島の陸域では宮古島と同様にサトウキビ栽培が盛んであり、次いで牛の繁殖農家が生産する資料畑が農地利用の大半を占める構造は宮古島に類似する。また、生活排水も2004年当時污水处理人口普及率は33.5%であり、残りは地下浸透等の形で生活排水を排出し続けている状況であると推察される。実際に中野ほか(2016)が与論島の地下水水質の主成分を分析した結果、与論島の地下水は海塩と石灰岩溶解の自然現象や農地排水・畜産排水等の社会経済活動によって水質形成が図られていることが示唆されている。さらに中野ほか(2017)は、この結果と海峡等の条件を基に与論島全域からの輸送物質の影響が想定される範囲を計算対象海域として、流動シミュレーションモデルと物質拡散モデルを構築し流動計算を行った結果、与論島周辺海域の水温条件はサンゴ被度に関与していること、また、与論島東部礁池内で潮汐によって栄養塩の濃度分布は変化し、礁池外の海域からの海水交換が少ないことに起因して高い濃度の栄養塩が礁池内に留まる傾向が認められた。さらに、陸域からの窒素等の栄養塩が礁池内に滞留する傾向があることなど、サンゴ生態系への影響要因として与論島周辺海域の潮流条件や窒素等の陸域由来の栄養塩が関与していることを明らかにした。石垣島の白保サンゴ礁においても、北側の轟川と南側の宮良川より栄養塩の流入があると考えられるが、さらに、白保のサンゴ礁海域には、河川以外にも地下水を経由して陸域から海域への流入も確認されている。白保サンゴ礁と接する陸域は、中生代のトルム層の上に更新世の琉球石灰岩が覆っている。また、アオサンゴ群集に近い浜に接する場所では、2015年に太陽光発電パネル設置工事に向けたボーリング調査が実施された結果、地下2m付近までは石灰質の礫にシルトや砂が混じり、2m以深は琉球石灰岩であった。また同地における透水実験においても「試験の結果、地質は粗砂を主体とした砂質系やサンゴ礫・石灰岩礫の混入層に相当し、透水性は極めて良いものと見られる。」と記載されている(日建ハウジング 2016)。このように、白保サンゴ礁に接する陸域は、多孔質で割れ目や空洞が発達し透水性が大きい琉球石灰岩や透水性良い礫の混入層に覆われることか

ら、与論島の東海岸と類似の構造を有し、表層から地下への透水性が高く、陸域の表流水は地下水を介して白保サンゴ礁海域に流入するものと考えられる。実際に、白保サンゴ礁では陸域から地下水が流入していることは、既往の研究から明らかとなっている。Umezawa et al.(2002)は白保サンゴ礁では、 $100\sim 300\ \mu\text{M}$ 程度の高濃度の NO_3^- を含む地下水が陸域から流入していることが報告され、その起源は陸域からの人為的活動による窒素であることを明らかにした。また、Blanco et.al.(2011)は、ラドンを用いた測定により、白保サンゴ礁海域における地下水流出は、長さ 7 km のサンゴ海岸における沿岸への地下水流出量は、毎秒 $0.39\text{--}0.58\ \text{m}^3$ と見積もられた。これは、轟川からの河川水の流出量(毎秒 $1\text{--}2\ \text{m}^3$)に比べ、地下水流出は全体の 30% 以下しかいないが、溶存栄養分の流出は地下水の方が轟川と同等かむしろ轟川よりも大きい可能性を指摘している。また、轟川から流入する硝酸態窒素流出速度は毎秒 1g 以下である(Blanco et.al.2010)が、白保サンゴ礁全体における、地下水の硝酸態窒素流出速度は毎秒 $2.4\text{--}2.6\text{g}$ であること、さらに地下水が白保サンゴ礁の広域に及んで流出していることから、面源的に栄養塩をサンゴ礁内に供給し、地下水による白保サンゴ礁海域への影響は轟川から流入する栄養塩類と比較して影響が大きいことを示している。

このように、白保サンゴ礁では接する陸域の透水性が良いことから、地下水を介してサンゴ礁海域への負荷が及ぶ状況にある。これらの負荷は、主に陸域におけるサトウキビや牧草栽培のための施肥によるものと考えられるが、生きたサンゴが多い海域と集落の関係を考えると、生活排水による影響が及んでいる可能性も考えられる。現在、白保集落の前には生きたサンゴ群集は少なく、集落から離れた場所に生きたサンゴ群集が分布する。現在の白保集落は、人口が約 1600 人の規模である。白保集落では 2006 年より農業集落排水が整備されたが、それ以前の生活排水は地下浸透させる処理が主であった。また、2017 年時点における大浜・磯辺・宮良・白保の農業集落処理区で 25.6% の接続率に留まっていることから、現在も地下水を介して生活排水が隣接するサンゴ礁海域に流入していることが推察される。よって直接の因果関係は明らかではないが、白保集落の生活排水による栄養塩が地下水を介して集落前のサンゴ礁海域へ流入していると仮定すると、この海域にサンゴが少ない状況は生活排水による影響がある可能性が考えられる。

6-3. 観光利用の増加による影響

白保サンゴ礁海域ではアオサンゴ群集やサンゴが多く生息している場所において、浜から船で移動してスノーケルによる観察を行うツアーが催行されている。各国のサンゴ礁海域においては、ダイバー等がサンゴを折るなどの被害は加害でも多く指摘されている。国内においても敷田ほか(2011)により潜水観察及び特性調査の結果からダイバーが潜水中にサンゴに与える擾乱が、ほとんどのダイバーが関与している現象であることを示唆している。また、吉川ほか(2008)は、白保サンゴ礁海域において白保の観光被害状況の把握と共に、スノーケリングによるかく乱のメカニズムを解明し、最終的に環境にできるだけ負荷を与えないスノーケリング観光のあり方やマネジメント方法への示唆を得ることを目的とした調査を実施した。そこでは、スノーケル観光船の利用頻度の高い海域と低い海域に方形区を設置し、折れたサンゴの枝の数を比較するとともに折れた枝の追跡観察を行い、被覆にかかる時間を推定した。その結果、観光利用頻度が高い地域ほど、また、観光ピークシーズン中ほどサンゴの枝折れが多いことが、定量的データによって示された。そして、折れたサンゴ枝の露出した骨格は、アオサンゴで 30 日後まで、ユビエダハマサンゴでは 50 日後までにほぼ生組織で覆われることが明らかとなり、折れたサンゴの枝は、アオサンゴではほぼ 1 ヶ月、ユビエダハマサンゴで 1.5 ヶ月の被害期間が継続することを示した。スノーケラーの行動はアオサンゴ海域では手による接触が 56%、踏む

という足による接触は18%であり多くスノーケラーがサンゴへの接触を行うことが明らかとなった。これらの結果から、今後白保海域で遊泳するスノーケラーが増加することは、白保海域に生息するサンゴの損傷が増加し、サンゴ枝折れ等の負荷が増加することが予測される。

白保では、2005年7月に白保の海とその周辺の自然環境・生活環境の保全・再生とサンゴ礁資源の持続的な利用による地域振興の両立を図ることを目的に、有志の地域住民によって「白保魚湧く海保全協議会」が設立された。協議会では白保海域でのスノーケリングツアー等を行う事業者の自主ルールを策定し、利用者の安全とサンゴ礁の持続可能な利用を進めている。この取り組みは、2015年8月に沖縄県による保全利用協定の認定を受けた。本協定は、沖縄県内において環境保全型自然体験活動に係る事業者が、環境保全型自然体験活動を行う海域や場所の適正な保全と利用を目的として、地域住民・関係者からの意見を適正に反映しつつ、事業者間で自主的に策定・締結するルールを県が認定する制度である。このように、白保のサンゴ礁では地域の事業者が海域の利用を管理している状況であるが、利用者が急増した場合にこれらの事業者を利用しないで白保海域で遊泳するなどの状況が生じれば、これまでも管理が及ばない状況に至ることも予測される。すでに多くの負荷がサンゴにかかっている状況において、これ以上の観光による負荷の増加は、白保サンゴ礁海域においては、さらなるサンゴ礁生態系の衰退を招く可能性が高い。例えば、アメリカ国立海洋局(2019)によれば、流れ落ちた日焼け止め成分がサンゴや藻類に影響があるだけでなく、ウニ、魚類やイルカなどにも影響する可能性があることを指摘している。アメリカ合衆国ハワイ州では、海洋生物に影響があるとされる物質を含む日焼け止めの販売を2021年から禁止する州法に署名するなどの対策が進んでいる。日本においても、Tashiro and Kameda(2013)が沖縄島の海浜およびサンゴ礁において海水中の日焼け止め剤濃度を測定し、海水浴シーズンになる夏季に濃度が高くなることが確認されていることから、日本で販売使用されている日焼け止めもサンゴ礁海域に影響を与えていることが懸念される。

今後、石垣島を訪れる観光客が増加し続けた場合、白保サンゴ礁にどれほどの人数が訪れるか具体的な予測は難しいが、海域を利用する観光客数は増加することが考えられる。現在の白保海域は、アオサンゴ群集等の生態系の価値が高いことから観光利用がなされているが、利用過剰による荒廃で価値が下がることは、白保海域で観光業および漁業で生業を立てる地元住民の経済的損失に直結する。陸域からの赤土や栄養塩による負荷がかかっている現状において、これ以上の負荷がかかる要因である観光利用については、予測される影響と対策について慎重な検討が必要である。

7.まとめ

白保サンゴ礁は、陸域に海岸線と並行する連続性の良い裾礁タイプのサンゴ礁である。礁池はアオサンゴ群集が発達する海域を中心として閉鎖的な状況にあり、夏の干潮時に高水温になりやすい。1980年代以降、高水温による白化現象や陸域からの影響によりサンゴ礁海域のサンゴは減少傾向にある。この海域にアオサンゴの大規模な群集が発達したことは、高水温に耐性が高いアオサンゴがこの場所に適応して大規模な群集を形成したと考えられる。一方、高温に弱い他のサンゴは相対的に少ない状態であり、サンゴの多様性が過去よりも低い状況にあると判断できる。この海域は、陸域からのサンゴの生育に悪影響を及ぼす赤土が流入し堆積している状態である。さらに、河川や地下水を通じ、陸域より栄養塩が流入している状況にある。このように、現在の白保サンゴ礁は、地形構造により閉鎖的な環境になりやすいことに加え、陸域に接していることから、河川と地下水を介して陸域を起源とする負荷を受けやすい脆弱性を有している。さらに、白保集落より北の東海岸沿いの陸域では、下水処理施設が未発達である

ため、この地域に人口増に伴う宅地開発や大規模な宿泊施設が建設された場合や、観光客の増加によるオーバーユースによる影響など、今後白保サンゴ礁海域へ人為的な影響がさらに増加する恐れも懸念される。白保サンゴ礁生態系は、過去と比較して造礁サンゴの数と多様性が減少していることから、陸域からの負荷を受け続けている状況にある。今後さらなる陸域からの負荷が増加することは、白保サンゴ礁生態系の衰退につながると考えられる。

【文献】

- 大垣俊一・野池元基 1992. 沖縄県石垣島の土地改良事業と白保のサンゴ礁. 日本生態学会誌. 42 (1): 9-20.
- 大見謝辰男 1995. 赤土汚染とサンゴ礁. みどりいし. No.6: 7-9.
- 大見謝辰男 1996. 赤土堆積がサンゴに及ぼす影響. 沖縄衛生環境研究報 30: 79-86.
- 亀崎直樹・宇井晋介 1984. 八重山列島における造礁サンゴ類の白化現象. 海中公園情報 61: 10-13.
- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉 2001. 石垣島白保アオサンゴ群集の成立過程. 日本サンゴ礁学会第3回大会講演要旨集; 5.
- 環境庁 1994. 第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書(干潟, 藻場, サンゴ礁調査), 第3巻サンゴ礁,
第4回自然環境保全基礎調査.(<https://www.biodic.go.jp/reports/4-13/s00a.html>)
- 環境省 2009. スポットチェック法によるサンゴ礁調査マニュアル.
- 環境省沖縄奄美自然環境事務所 2019. 報道発表資料「(お知らせ)米原海岸利用ルールの試験運用の開始について」. http://kyushu.env.go.jp/okinawa/pre_2019/post_79.html
- 神田太朗・赤松良久・池田駿介・赤堀良介 2010. 地下水によって輸送される陸域由来栄養塩が河川水質に及ぼす影響に関する研究. 水工学論文集 54: 1219-1224.
- 金城孝一・比嘉榮三郎・上原陸男 2005. 赤土流出状況とサンゴに及ぼす影響について. 沖縄衛生環境研究報 30: 63-74.
- 金城孝一・比嘉榮三郎・大城洋平 2006. 沖縄県のサンゴ礁海域における栄養塩環境について. 沖縄環境研究所報 40: 107-113.
- 金城孝一 2017. 陸域からの環境負荷対策. 日本サンゴ礁学会誌 Galaxea, 19: 87-94.
- 坂西研二・中村 乾 2007. 石垣島宮良川流域における懸濁性土壌, 窒素およびリンの推定流出量, 農業農村工学会誌 75(9): 821-824, a3.
- 敷田麻実・横井謙典・小林崇亮 2011. ダイビング中のサンゴ擾乱行動の分析 沖縄県におけるダイバーのサンゴ礁への接触行為の分析. 日本沿岸域学会論文集 13: 105-114.
- 下田 徹・市川忠史・松川康夫 1998. 琉球諸島のサンゴ礁における栄養環境とそのサンゴ生育への影響. 中央水産研究所調査報告 12: 71-80.
- 鈴木倫太郎・長谷川 均・前川 聡・佐川鉄平・柴田 剛・市川清士・後藤慶之 2011a. 石垣島白保サンゴ礁におけるアオサンゴ群集の分布と形成過程に関する考察. 駒澤地理 47: 49-56.
- 鈴木倫太郎・前川 聡・佐川鉄平・柴田 剛・市川清士・後藤慶之・長谷川 均 2011b. 石垣島白保サンゴ礁における白化現象の分布と水温の関係. 地域学研究 24: 27-40.
- 鈴木倫太郎・長谷川 均・前川 聡・柴田 剛・佐川鉄平・後藤慶之・市川清士 2012. サンゴ礁浅海域における保全を目的とした地図の作製. 地図 50. No.1.
- 鈴木倫太郎・上村真仁・鈴木智子・前川 聡・佐川鉄平・新里昌俊・棚原哲雄・小林 孝・新城 智・屋良部 勉・赤嶺 真・新里昌央・八幡雪絵 2014. 石垣島白保サンゴ礁浅海域における地域住民による調査の実施と造礁サンゴ群集の5年間の変化. 地域学研

- 究 27:77-86.
- 鈴木倫太郎 2017. 造礁サンゴの大規模白化現象における NGO による活動とサンゴ礁保全の取組. GALAXEA19.
- 谷中絢貴・波利井佐紀・香川浩彦・上野光弘・北野裕子・斎藤佑太・長井 敏・安田仁奈 2018. 石西礁湖周辺における遺伝的に異なる 2 タイプのアオサンゴ *Heliopora coerulea*(Pallas, 1766)の生殖時期推定. GLAXEA. No20: 39-51.
- 田村 仁・灘岡和夫・Paringit, E.,・三井 順・波利井佐紀・鈴木庸彦 2003. リーフ地形効果に着目した石垣島東岸裾礁域の流動構造に関する研究. 海岸工学論文集 50: 386-390.
- 中井達郎 2005. 海草藻場の拡大とサンゴ場の縮小は何を意味するのか?, 日本サンゴ礁学会第 8 回大会講演要旨集: 30.
- 中井達郎 2007a. サンゴ礁裾礁における空間構造把握のための自然地理的ユニットの設定. 地学雑誌 116(2): 223-242.
- 中井達郎 2007b. サンゴ礁保護区の設定における自然地理的ユニットの応用-石垣島白保サンゴ礁を例に-. 日本地理学会発表予稿集 71: 180.
- 仲宗根一哉・比嘉榮三郎・大見謝辰男・安村茂樹・灘岡和夫 2001 石垣島轟川の SS と栄養塩濃度. 沖縄県衛生環境研究所報 35. 93-101
- 中西康弘 2002. 『サンゴの島の地下水保全-「水危機の世紀」を迎えて-』宮古島地下水保全対策協議会: 182.
- 中野拓治・畑 恭子・山本一生・渡邊暢雄 2016. 鹿児島県与論島地下水の水質組成成分影響要因. 第 19 回日本水環境学会シンポジウム講演集: 76.
- 中野拓治・畑 恭子・山本一生・渡邊暢雄 2017. 亜熱帯沿岸域を含む健全な水環境の構築と管理に向けた取組(地域の暮らしとサンゴ礁生態系つながり構築に向けて). 日本サンゴ礁学会誌 19: 95-108.
- 中村 崇・山崎征太郎・神木隆行・山崎秀雄 2006. サンゴ礁のストレス事情—浅瀬のサンゴの我慢比べ—. 琉球大学 21 世紀 COE プログラム編集委員会編 美ら島の自然史 サンゴ礁島嶼系の生物多様性. 東海大学出版会: 132-146.
- 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井陽介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰男・満本裕彰・小林 孝・藤井智史 2001. 現地観測に基づく石垣島サンゴ礁海域の流動特性と微細土砂・熱輸送特性に関する解析. 海岸工学論文集 48: 1151-1155.
- 夏花 HP : <http://natsupana.com/whatwedo/chosa/kekka/>
- 西平守孝・Veron, J. 1995. 『日本の造礁サンゴ類』海游舎.
- 日建ハウジング 2016. 白保兼久原の太陽光発電に係る開発行為の届出.
- 長谷川 均・山野博哉 2004. 石垣島, 八重山群島, 日本各地のサンゴ礁の現状. 『日本のサンゴ礁』環境省・日本サンゴ礁学会編. 環境省.
- 長谷川 均 2011. 陸域の開発に伴うサンゴ礁環境の悪化-石垣島白保サンゴ礁を例に-, 日本リモートセンシング学会誌 31. No.1: 73-86.
- 波利井佐紀・灘岡和夫 2003. 環境ストレスとしての赤土懸濁・堆積がサンゴ幼生定着に及ぼす影響. 海岸工学論文集. 土木学会 50: 1041-1045.
- 日高道雄 2006. 褐虫藻の多様性と造礁サンゴのストレス耐性. 琉球大学 21 世紀 COE プログラム編集委員会編『美ら島の自然史』東海大学出版: 147-164.
- 堀 信行 1990. 世界のサンゴ礁からみた日本のサンゴ礁. サンゴ礁地域研究グループ『熱い自然-サンゴ礁の環境誌-』古今書院. 3-24.
- 前川 聡 2005. 石垣島周辺海域におけるサンゴ被度の変遷概況. 石垣島のサンゴ礁環境 II. WWF ジャパン.

目崎茂和・小橋川共男 1989 石垣島・白保サンゴの海—残された奇跡のサンゴ礁 高文研: 122p

目崎重和・渡久地 健 1991 石垣島のサンゴ礁地形とその地域区分. 石垣島のサンゴ礁環境. 南西諸島自然保護特別事業調査報告書 5 世界自然保護基金日本委員会. : 87-107.

石垣島・白保サンゴの海—残された奇跡のサンゴ礁

吉川明子・麻生一枝・前川 聡 2008. 平成 18・19 年度 「石垣島白保サンゴ礁における観光利用の実態と被害状況の調査」 調査報告書: 24.

WWF ジャパン HP : <https://www.wwf.or.jp/activities/activity/1631.html>

- Blanco, A.C., Watanabe, A., Nadaoka, K., Motooka, S., Herrera, E. C. & Yamamoto T. 2011. Estimation of nearshore groundwater discharge and its potential effects on a fringing coral reef. *Marine Pollution Bulletin*. 62(4): 770-785.
- Blanco, A.C., Nadaoka, K., Watanabe, A., Motooka, S., Herrera, E., Yamamoto, T. 2010. Dynamic evolution of nutrient discharge under stormflow and baseflow conditions in a coastal agricultural watershed in Ishigaki Island, Okinawa, Japan. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7685>.
- Harii, S. & Kayanne, H. 2003. Larval dispersal, recruitment and adult distribution of the brooding stony octocoral *Heliopora coerulea* on Ishigaki Island, southwest Japan. *Coral Reefs* 22: 188-196.
- Kayanne, H., Suzuki, A., & Saito, H. 1995. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. *Science* 269: 214-216.
- Lalli, C.M. & T.R. Persons 1993. 海洋生物学入門. 長沼 毅(訳), 第3章: 植物プランクトンと一次生産, 講談社サイエンティフィック: 28-51.
- Nakamori, T., Suzuki, A. & Iryu, Y. 1992. Water circulation and carbon flux on Shiraho coral reef of the Ryukyu Islands, Japan. *Continental Shelf Research*, 12: 939-949.
- National Ocean Service (アメリカ国立海洋局) 2019. Skincare Chemicals and Marine Life. <https://oceanservice.noaa.gov/news/sunscreen-corals.htm>
- Sano, M., Shimizu, M. & Nose, Y. 1987. Long-term effects of destruction of hermatypic corals by *Acanthaster planci* infestation on reef fish communities at Iriomote Island, Japan. *Marine Ecology Progress Series* 37: 191-199.
- Tashiro, Y. & Kameda, Y. 2013. Concentration of organic sun-blocking agents in seawater of beaches and coral reefs of Okinawa Island, Japan, *Marine Pollution Bulletin* 77: 333-340.
- Umezawa, Y., Miyajima, T., Koike, I., & Kayanne, H. 2002. Significance of groundwater nitrogen discharge into coral reefs at Ishigaki Island, southwest of Japan. *Coral Reefs* 21: 346-356.
- Yamano, H., Kayanne, H., Yonekura, N., Nakamura, H., & Kudo, K. 1998. Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ishigaki Island, Southwest Japan. *Coral Reefs* 17: 89-99.
- Yamazato, K. 1981. A note on the expulsion of zooxanthellae during summer, 1980, by the Okinawan reef-building corals, Sesoko Marine laboratory Technical report.
- Yasuda, N., Taquet, C., Nagai, S., Fortes, M., Fan, T.Y., Phongsuwan, N. & Nadaoka, K. 2014. Genetic structure and cryptic speciation in the threatened reef-building coral *Heliopora coerulea* along Kuro-shio Current. *Bull Mar Sci*, 90: 233-255.
- Yasuda, N., Taquet, C., Nagai, S., Fortes, M., Fan, T.-Y., Harii, S., Yoshida, T., Sato, Y. & Nadaoka,

K. 2015. Genetic diversity, paraphyly and incomplete lineage sorting of mtDNA, ITS2 and microsatellite flanking region in closely related *Heliopora* species (Octocorallia), *Molecular Phylogenetics and Evolution* 93: 161–171.

発行：公益財団法人 世界自然保護基金ジャパン (WWF ジャパン)

2020 年 2 月 14 日

編集者：WWF ジャパン 鈴木 倫太郎

東京都港区三田 1 丁目 4-2 8 三田国際ビル 3F tel:03-3769-1711