

## 1.4.2 サンゴ白化要因の解析

### (1) はじめに

2016年夏季、石西礁湖では異常な高水温が続き、かつてないレベルでのサンゴの白化が起こった。その詳細な種レベルの解析は次年度以降に行われると思われるので、本業務では、過年度におけるサンゴ白化の環境要因について解析を行った。

### (2) 方法

サンゴの白化は、主として高水温の連続により、サンゴ細胞内に共生する褐虫藻の退縮、白化により起こるとされているが (Kuroki & van Woesik 1999)、白化に関する環境要因には、他にも紫外線があり、浅所では影響が強い。そこで、本項では、石西礁湖における水温、気温、紫外線量の情報を収集し、また、気温 30℃以上の日数と白化気温指数 (30℃を超えた値の合計) (Okamoto et al. 2007) を解析し、サンゴ白化要因を検討した。

### (3) 結果

#### 1) 水温・気温

環境省海洋観測モニタリングブイ設置以降の月平均水温と石垣島地方気象台の月平均気温の変化を図 1.4.2.1 に示す。2013年7月、2014年7月、9月、2016年7、8月は月平均水温が 30℃を超えていた。

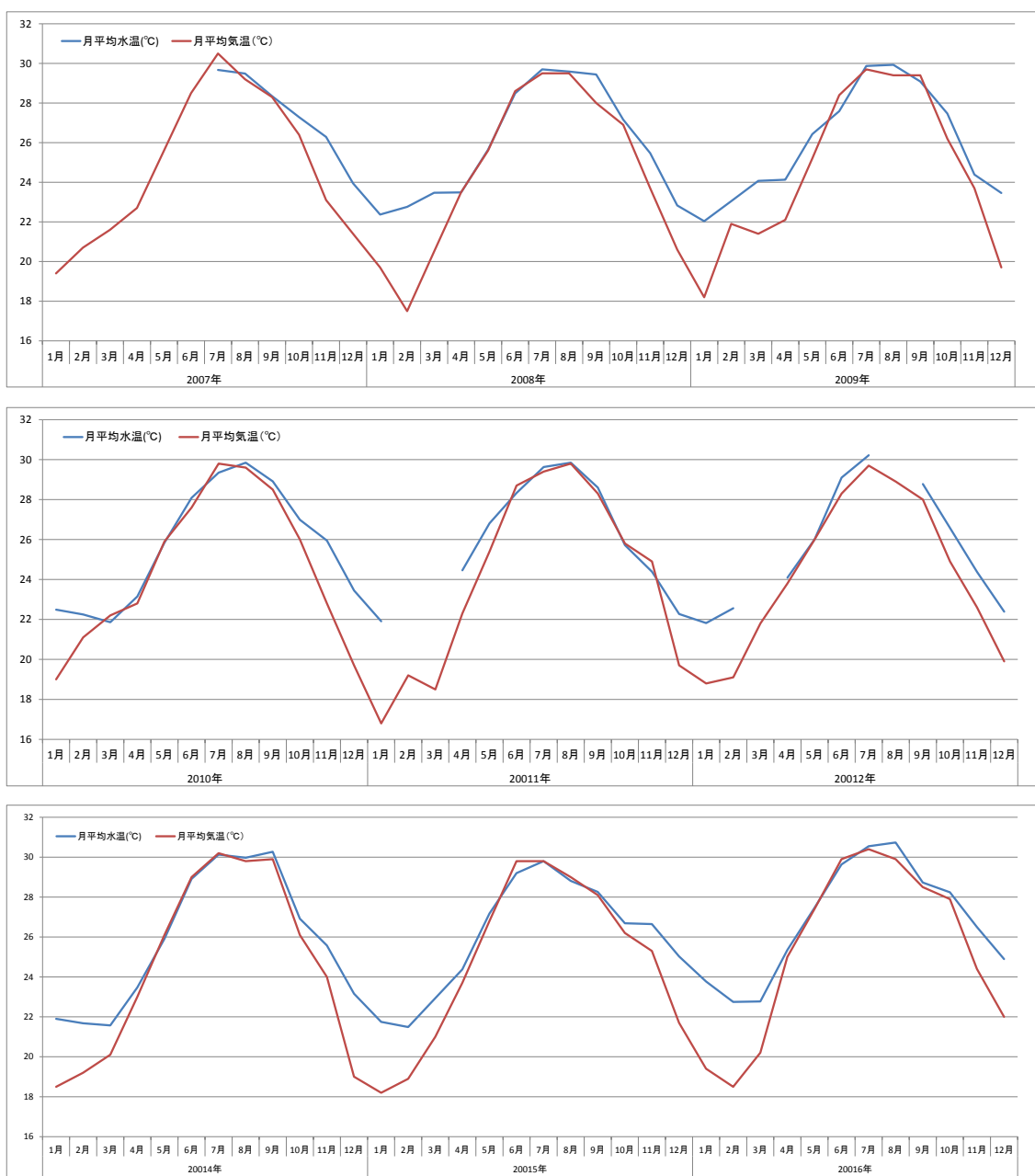


図 1. 4. 2. 1 月平均水温（石西礁湖モニタリングブイ）と月平均気温（石垣島地方气象台）

## 2) 紫外線

紫外線量については、石西礁湖において連続的に観測されていないため、気象庁が衛星による上空のオゾン量やアメダスの日照時間等のデータ(1時間積算値)を用いて約20km四方の領域で算出したUVインデックス(推定値)の2005年～2016年における月平均値を示す(図1.4.2.2)。UVインデックスは総じて7月に最高値を示す傾向がみられた。

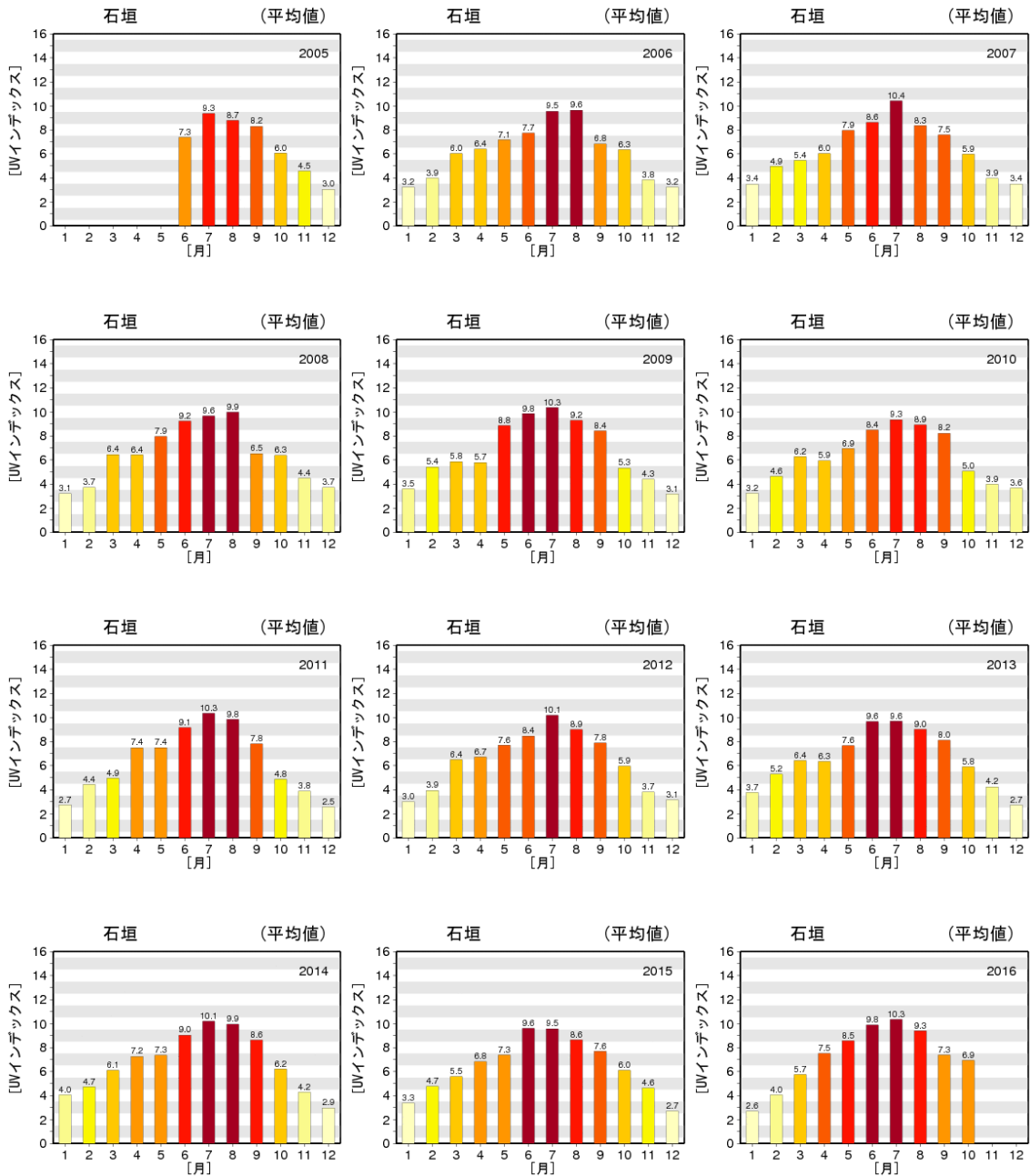


図 1.4.2.2 石垣島における UV インデックス (推定値) の月平均値 (2005 年～2016 年)

(4) 考察

気温 30℃以上の日数と白化気温指数 (30℃を超えた値の合計) を整理し、7月の UV インデックス推定値と合わせたものを表 1.4.2.1 に示す。Okamoto et al. (2007) は、気温 30℃以上が 30 日以上で、白化気温指数が 10 以上の年は白化が起きる目安 (指標) としている。

白化指標を満たしたのは、1998 年、2001 年、2003 年及び 2007 年、2010 年及び 2013

年～2016年であり、白化がみられた年と概ね一致した。大規模な白化現象がみられた2016年は、気温30℃以上の日数（65日）及び白化気温指数（36）がこれまでで最大となっていた。

UVインデックスは大規模な白化があった2007年や2016年で高い傾向があるものの、白化が目立たなかった2009年、2011年、2012年でも高く、白化との明瞭な関係は認められなかった。

表 1.4.2.1 気温30℃以上の日数と白化気温指数・UVインデックスの年変化  
(赤字：白化気温指数10以上、気温30℃以上30日以上)

	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年
白化気温指数	25.2	0.9	0.3	10.8	0.5	16.6	0.5	1.5	4.7	22.1
気温30℃以上日数	45	9	5	34	5	35	4	12	13	40
7月UVインデックス								9.3	9.5	10.4

#### 石垣気象台

	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
白化気温指数	5.2	7.7	13.8	4.4	2.8	14.5	21.8	15.1	36
気温30℃以上日数	20	28	40	28	11	40	56	33	65
7月UVインデックス	9.6	10.3	9.3	10.3	10.1	9.6	10.1	9.5	10.3

(気象庁データベースより整理・解析)

#### (5) 課題

##### 1) サンゴ白化対策

GBR海中公園局は2006年、NOAA、IUCN（国際自然保護連合）の支援を得て、「サンゴ白化対策ガイドブック」を刊行した(Marshall & Schuttenberg 2006)。その中で、サンゴの高水温に対する適応について言及している。例えば、アラビア湾では、白化海域より10℃水温が高くても同種のサンゴに白化がみられないことがあげられている。褐虫藻にはいくつかのタイプ（クレード）があり、それらは高水温への耐性が異なることが知られており、サンゴは褐虫藻を環境条件に合わせて、変えていくことで、進行する水温上昇に対して順応するとされている（中村 2012）。

同種であっても白化への耐性が群体により異なるのは、保有する褐虫藻のタイプ（Clade）が異なる場合である。Cladeにより高温耐性が異なることが知られており、サンゴはClade D1、D1a、C15のような褐虫藻を有することにより、高温耐性を有すると考えられている(Mascarelli 2014)。

「ガイドブック」では、サンゴ礁のresilience（回復力）の保全を白化対策として重視している。resilienceとは、“変化への適応能力を再建するシステムの潜在力”で、resilienceの高いサンゴ群集は、白化により大きな死滅を被っても再建し、群集構成を同様の形態で、白化耐性を有するものに移行させる、というものである。過去の高水温により白化が起り、死滅したが、その後高い被度に回復した群集をいい、これらの群集を保全活用し、サンゴ礁の回復に結び付けようとするものである。白化耐性を有する

種あるいは群体が多くみられる海域を特定し、回復のための保全措置を行うことが有効と考えられる。

また、国際的な米国環境保護団体 TNC (The Nature Conservancy) は次のような回復手法を提案している (The Nature Conservancy and Partners 2004)。

#### ①海水冷却

深海からの湧昇が起こるような場所では、恒常的に水温は低下している。水深、海流、卓越風がサンゴ礁の水温低下に重要な役割を果たす。パラオでは冷水により、白化が起こりにくい海域を特定する白化予測プログラム (TNC、NOAA、AIMS) を開発している。

#### ②遮光

地形的、水深的特性により遮光が発生し、白化が低減する場所がある。それは、急峻な海底地形を有する裾礁で、パラオやフィリピンにみられる。

#### ③スクリーン

堆積物や栄養塩によるプランクトン増殖はサンゴにストレスを与えるが、自然レベルの懸濁物質は日射を弱めるスクリーン効果があり、白化を軽減できる。懸濁海域における有機物は紫外線を減衰させるという研究がある。この海域のサンゴは白化に対する感受性が低いかもしれない。

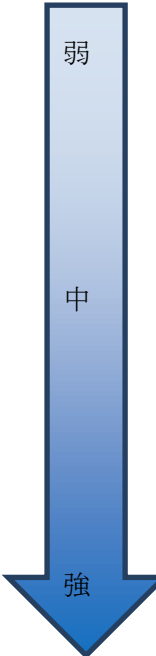
#### ④高温耐性サンゴ

サンゴ群集構造を調査することは白化耐性海域を知るのに役立つ。過去の白化観察により、ある種のサンゴは白化耐性を有することを示している。白化耐性サンゴが卓越していれば、白化は軽減できる。

一般に、ハマサンゴ科、キクメイシ科、オオトゲサンゴ科のように成長が遅く塊状で丈夫な骨格を有し、厚い組織を持つサンゴは白化耐性を有する (Marshall & Baird 2000)。また、浅瀬の濁った場所によくみられるスリバチサンゴ属のような種は最も耐性が高い。緻密な構造を有し、組織が薄く、成長が速く、ポリプ間の連結が良い種は白化しやすい傾向がある。組織の厚さが白化の感受性と相関がある (Lajeunesse et al. 2003, Fitt et al. 2000)。耐性が低いのはハナヤサイサンゴ科、ミドリイシ科 (特に枝状、卓状)、アナサンゴモドキ属である。表 1.4.2.2 に属レベルでの白化耐性の強弱を示す (Marshall & Schuttenberg 2006)。

なお、表 1.4.2.2 の白化耐性が強とされている多様な科には、Marshall & Baird (2000) によれば、クサビライシ科、ヒラフキサンゴ科、ヤスリサンゴ科、オオトゲサンゴ科、ビワガライシ科が該当すると思われる。

表 1.4.2.2 白化耐性の強弱 (Marshall & Schuttenberg 2006)

耐性	生育形	科	属
	緻密な枝状	ハナヤサイサンゴ科	トゲサンゴ属 ショウガサンゴ属 ハナヤサイサンゴ属
	枝状、卓状、被覆状、 葉状	ミドリイシ科	ミドリイシ属 コモンサンゴ属
	塊状 (脳状)	キクメイシ科	キクメイシ属 カメノコキクメイシ属 ナガレサンゴ属 ココメノコキクメイシ属 ノウサンゴ属
	塊状 (丸石状)	ハマサンゴ科	ハマサンゴ属 ハナガササンゴ属
	多様	多様	スリバチサンゴ属 トゲキクメイシ属

また、サンゴが持つ蛍光タンパク色素が白化を妨げることも指摘されている。色素は強光下では、低光合成活性を示す波長で余剰エネルギーを消散させ、色素細胞が可視光～赤外光の蛍光を出すことにより強光阻害を防止する (Salih et al. 2000)。色素はまた組織内で移動することにより、褐虫藻のために光量を調節し、遮光の役割を果たす。この色素は緑色蛍光タンパク類で pocilloporin とされている (Dove et al. 2001)。

さらに、最近ではサンゴに共生するバクテリア群の変化により、サンゴは温度耐性を有し、高水温に適応するという報告もある (Ziegler et al. 2016)。

## 2) 白化耐性海域調査

台風のような攪乱から早く回復した海域は、白化からも早く回復する傾向があるとされているため (Marshall & Schuttenberg 2006)、海域の回復力の評価を行う必要がある。日射エネルギーの 98% 以上は水深 4m 以内で減衰し、これによる熱は下層の冷水と攪拌されないかぎり表層に残る。流れの速い海域では、風、海流、潮汐が連関して鉛直的攪拌を起し、水温が低下する。水路のように流れの速い場所では、サンゴは白化しにくく、白化しても回復しやすい (Nakamura et al. 2003)。

2016 年夏季の北礁礁縁と礁湖中部礁縁での水温鉛直分布経時変化をみると、相対的に白化程度が小さかった北礁では周期的に鉛直循環が起こっているようにもみられ、この海域の流動調査が望まれる。

また、白化耐性を有するサンゴをみつけるために、PAMによる白化生残サンゴの健康度調査を実施する必要がある。石西礁湖においては、2001年8月の高水温時にPAMを用いたサンゴの健康度が調査されており、白化サンゴの健康度の把握に有効であることが示されている (Okamoto et al. 2005)。

#### 引用文献

- Dove SG, Hoegh-Guldberg O, Ranganathan S (2001) Major colour patterns of reef-building corals are due to a family of GFP-like proteins. *Coral Reefs*, 19:197-204.
- Fitt WK, McFarland FK, Warner ME, Chilcoat GC (2000) Seasonal patterns of tissue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching. *Limnology and Oceanography*, 45:677-985.
- Kuroki T, van Woesik R (1999) Changes in zooxanthellae characteristics in the coral *Stylophora pistillata* during the 1998 bleaching event. *Galaxea, JCRS* 1:97-101.
- Lajeunesse TC, Loh WK, van Woesik R, Hoegh-Guldberg O, Schmidt GW, Fitt WK (2003) Low symbiotic dinoflagellate diversity in Great Barrier Reef corals relative to those of the Caribbean. *Limnology and Oceanography*, 48:2046-2054.
- Marshall P, Schuttenberg H (2006) A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching, Great Barrier Reef Marine Park Authority.
- Mascarelli A (2014) Designer reefs. *Nature* 508:444-446.
- Marshall PA, Baird AH (2000) Bleaching of corals on the Great Barrier Reef, differential susceptibilities among taxa. *Coral Reefs* 19:155-163.
- 中村 崇 (2012) 造礁サンゴにおける温度ストレスの生理学的影響と生態学的影響, 海の研究 21 (4) : 131-144.
- Okamoto M, Nojima S, Furushima Y (2007) Temperature Environments during Coral Bleaching Events in Sekisei Lagoon. *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.* 71(2):112-121.
- Okamoto M, Nojima S, Furushima Y, Nojima H (2005) Evaluation of coral bleaching condition in situ using an underwater pulse amplitude modulated fluorometer. *Fish Sci* 71(4):847-854.
- Salih A, Larkum A, Cox G, Kühl M, Hoegh-Guldberg O (2000) Fluorescent pigments in corals are photoprotective. *Nature* 408:850-853.
- The Nature Conservancy and Partners (2004) R<sup>2</sup>-Reef resilience: building resilience into coral reef conservation; additional tools for managers: Vol. 2.0. CD ROM Toolkit.
- Ziegler M, Seneca FO, Yum LK, Palumbi SR, Voolstra CR (2016) Bacterial community dynamics are linked to patterns of coral heat tolerance. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms14213.