

1. 過年度調査データの可視化及び解析

「平成27年度石西礁湖自然再生事業評価手法検討等業務」（以下、H27年度業務という）¹において収集、整理、可視化した情報について、さらに進めた可視化、解析等を行うとともに、関係する文献を収集補足し、石西礁湖の経年変化解析の充実を行った。

1.1 モニタリングサイト 1000 調査データの解析（サンゴ被度）

(1) はじめに

H27 年度業務において、モニタリングサイト 1000 調査地点サンゴ被度経年データ（1983 年～2013 年）がエクセル表として整理された。地点毎の経年変化の詳細な解析は、過年度報告書（環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 2015）に記載されているので、本項では、石西礁湖への攪乱が海域区分的に示され、今後の保全再生対策を適切に進めることができるよう、上記のデータ表を解析し、サンゴ被度経年変化を海域区分毎に可視化した。なお、モニタリングサイト 1000 調査の調査マニュアルを本項末に付.として添付した（p. 1. 1. 31）。

(2) 方法

1) 調査地点の層別

石西礁湖は地形的に大きく礁湖・礁池内と礁湖外縁に分けられる。両者は、底質、波浪、水温、透明度等、明らかに異なる環境条件下にある。そのため、調査地点を図 1. 1. 1 に示す地形区分に従い、次のように層別した。

- ①礁斜面（礁縁、縁溝・縁脚系）
- ②礁池（浅くて半閉鎖的）、礁湖内縁（礁原縁辺、浅い）
- ③礁湖（礁湖の離礁を含む）
- ④水路

2) 被度経年データ表の操作

層別区分ごとにエクセルのデータ表に示されたセルの色彩がグラデーションごとに集約するように行を適宜入れ替えた。

¹ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・日本工営株式会社（2016）平成 27 年度石西礁湖自然再生事業評価手法検討等業務報告書

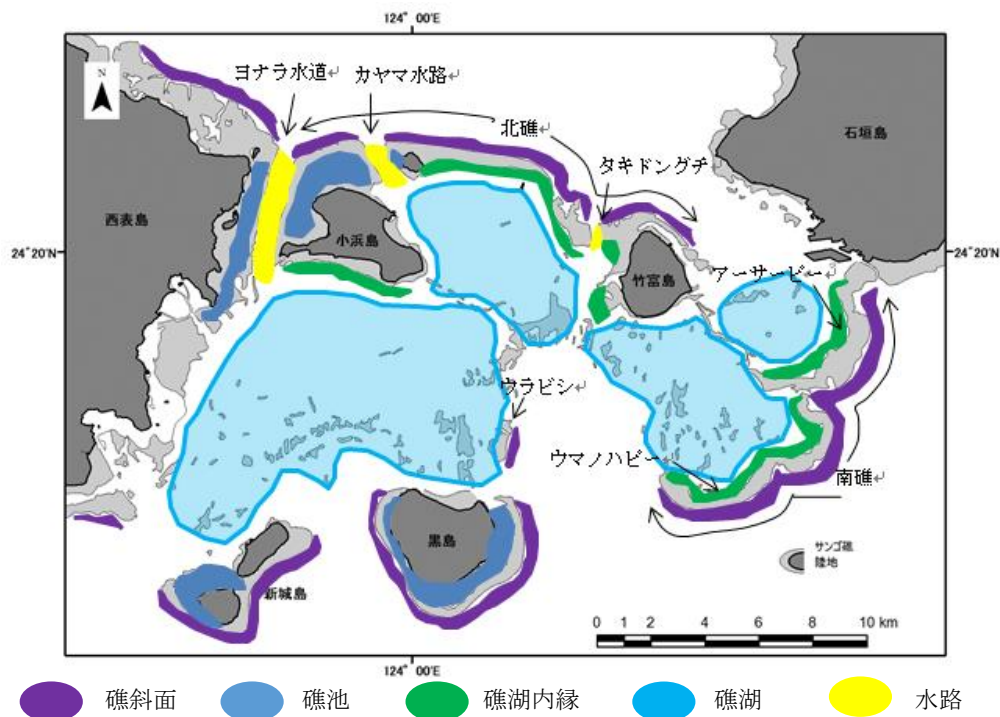


図 1.1.1 石西礁湖地形区分概念図

(3) 結果

1) 礁斜面 (図 1.1.2)

1983 年～1992 年頃、南礁及び北礁の礁斜面では、嘉弥真島、小浜島等を除いて、ほぼ低被度であった。これらの礁では 1993 年頃～1997 年頃、被度は急激な回復をみせたが、1998 年頃、北礁のサンゴ群集は急激にサンゴ被度を低下させた。一方、南礁では、サンゴ被度の低下は軽微であった。しかし、新城島付近では北礁と同程度の低下がみられた。

2007 年頃から、南礁及び新城島付近でサンゴ被度の低下がみられた。一方、1998 年、サンゴ被度が低下した北礁では全く被度の低下は見られなかった。

なお、新城島下地西岸では 1998 年以降、サンゴ被度は低位で推移している。

2) 礁池・礁湖内縁 (図 1.1.3)

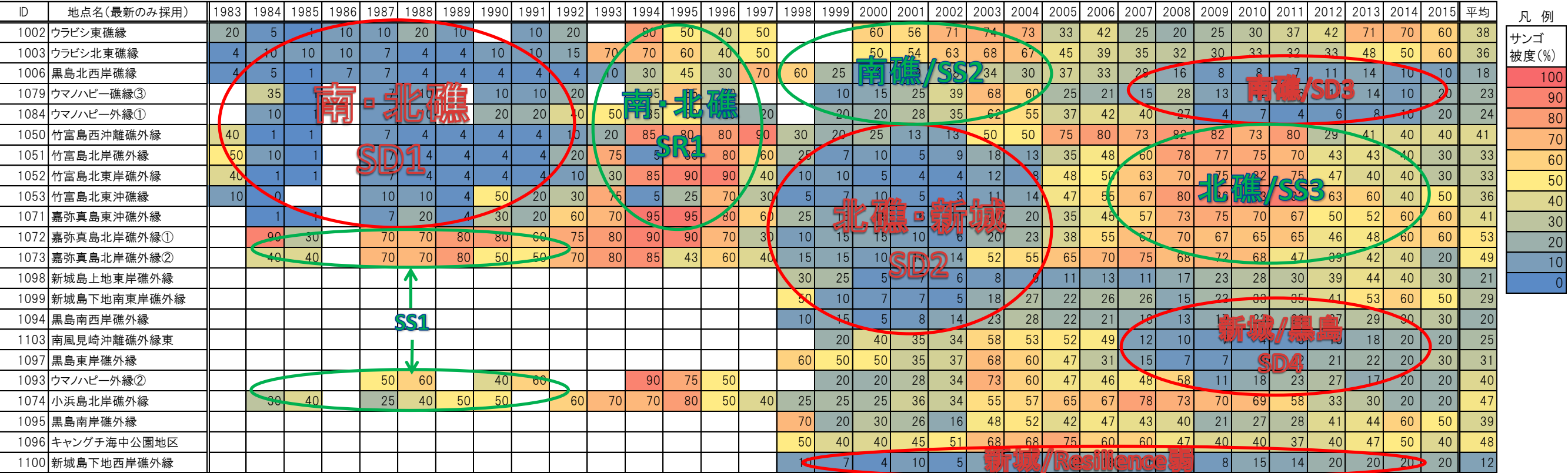
礁池・礁湖内縁においても、1983 年頃～1993 年頃、大半の地点でサンゴ被度の低下みられた。また、1996 年頃～2003 年頃、礁湖北部及び黒島では被度の低下がみられた。一方、その間、礁湖南部では、南礁礁斜面と同様にサンゴ被度の大きな低下はみられなかった。2007 年頃～2013 年、礁湖南部ではサンゴ被度の低下がみられたが礁湖北部や黒島では被度の低下は軽微であった。

3) 礁湖（礁湖の離礁を含む）（図 1.1.4）

礁湖離礁においても、前 2 者と同様の傾向がみられた。すなわち、1983 年頃～1993 年頃、礁湖の全域で被度の低下がみられた。1993 年頃から回復が進んだが、礁湖北部では回復が進まず、2002 年頃まで、低被度であった。一方、礁湖南部では、1992 年頃から回復が進み、2006 年頃まで、被度の高い状態が続いた。しかし、2007 年以降、被度の低下がみられた。なお、小浜島東海域では、1983 年以降 2013 年まで、低被度で推移している。

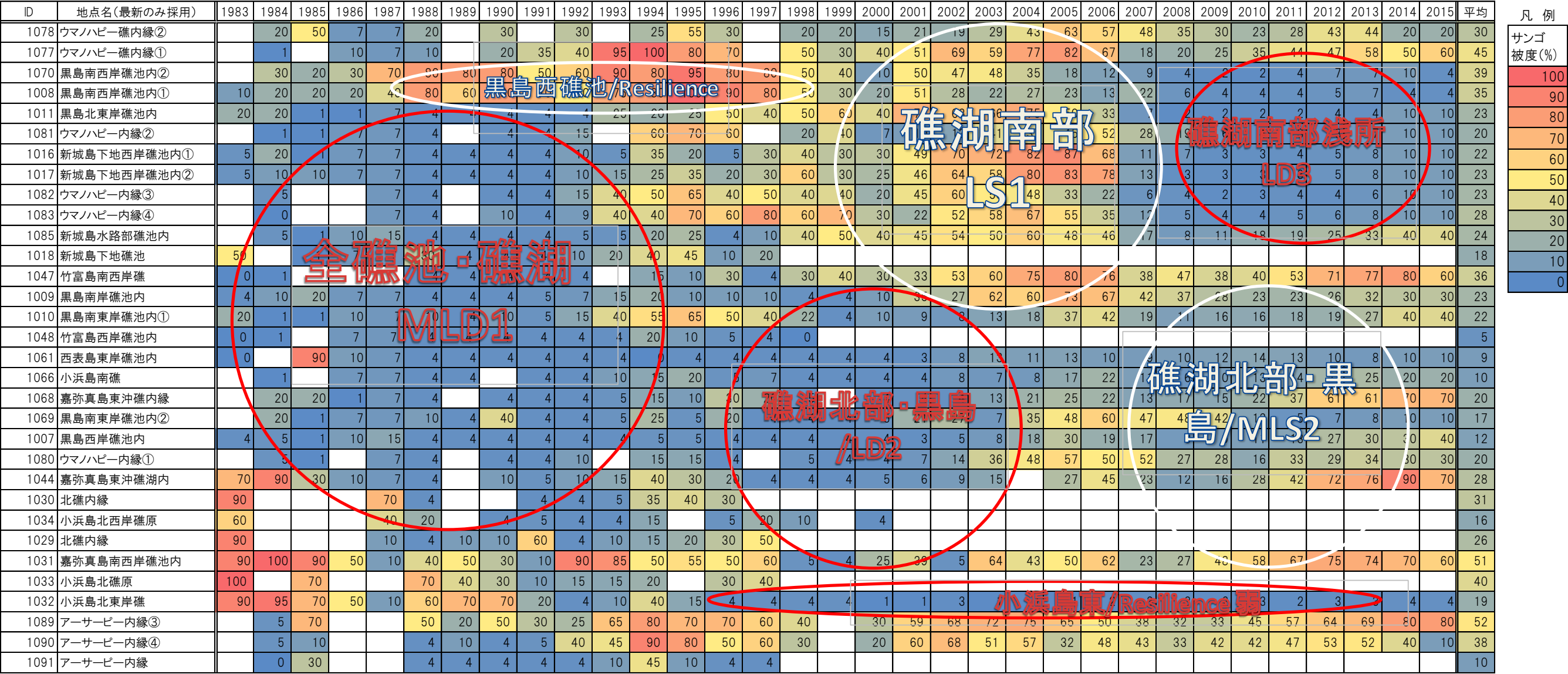
4) 水路（図 1.1.5）

水路は礁湖北部に位置するが、他の地形区分とはやや異なる変化を示した。1983 年～1992 年頃までは同様に低被度であったが、それ以後は回復し、礁湖に近い嘉弥真島南岸水路の地点を除いて 1998 年、2007 年の高水温時も大きな影響を受けなかった。



注) 1. 数字はサンゴの被度を示す
2. SD: Slope Decrease, SS: Slope Survive, SR: Slope Recovery

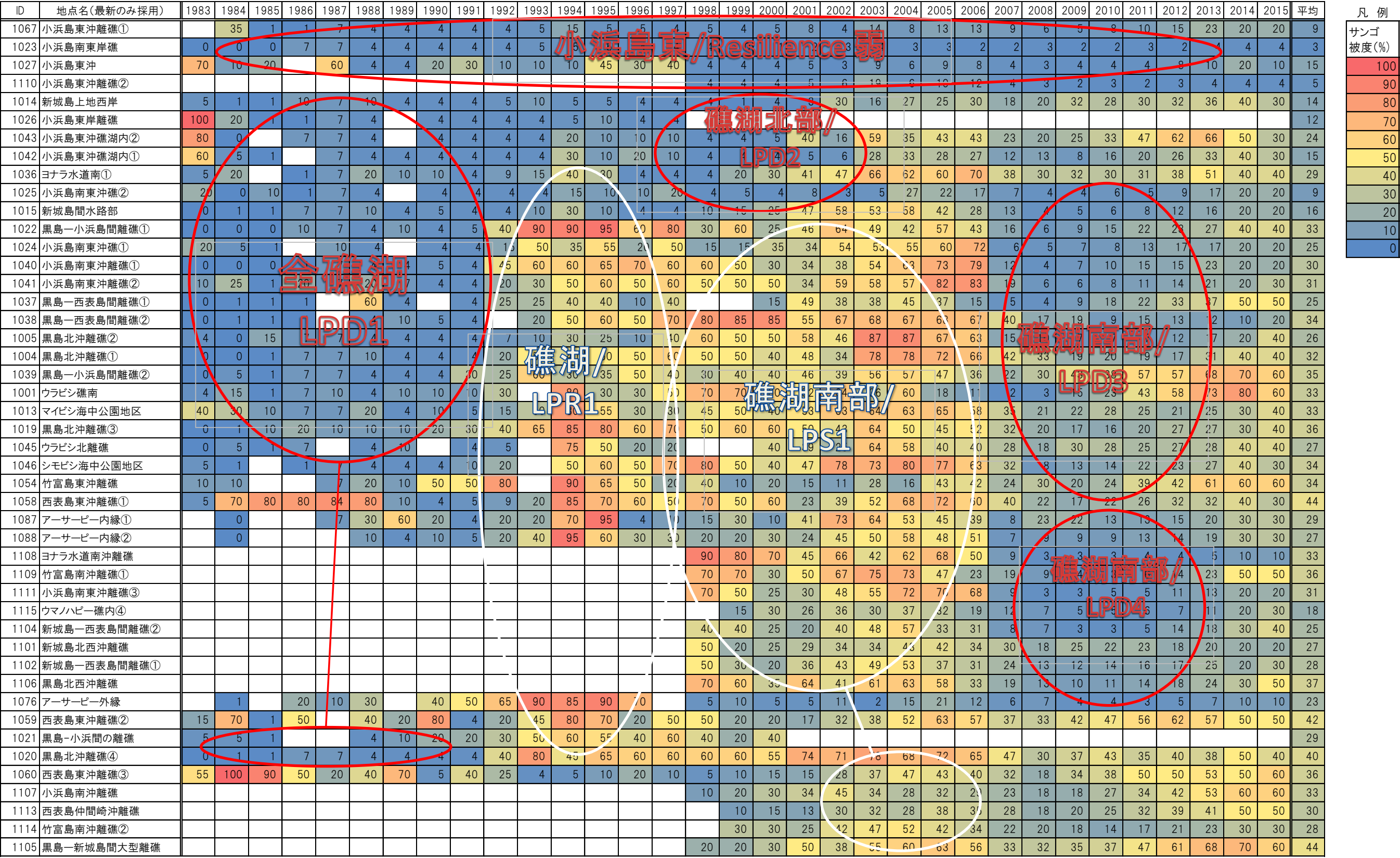
図 1. 1. 2 サンゴ被度経年変化表の類型区分 (礁斜面)



注) 1. 数字はサンゴの被度を示す

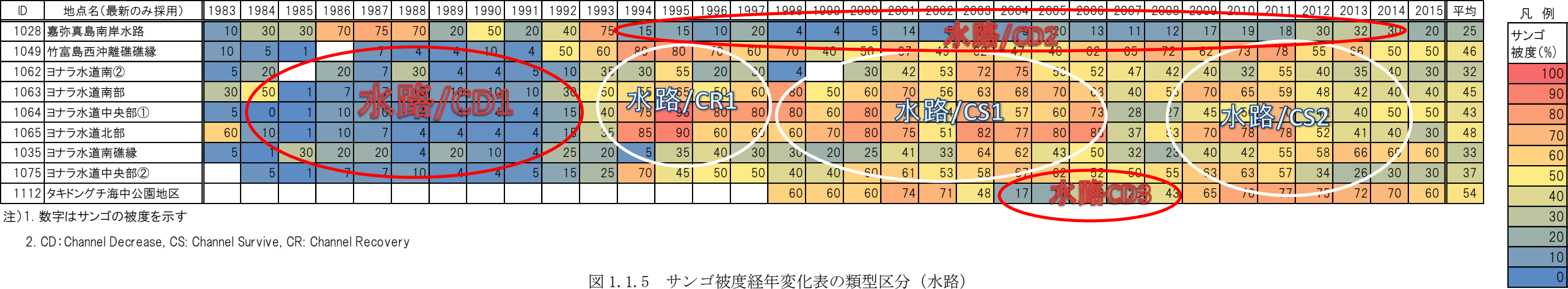
2. MLD: Moat/Lagoon Decrease, LD: Lagoon Decrease, LS: Lagoon Survive, MLS: Moat/Lagoon Survive, SR: Slope Recovery

図 1. 1. 3 サンゴ被度経年変化表の類型区分 (礁池・礁湖内縁)



注) 1. 数字はサンゴの被度を示す
2. LPD: Lagoon Patch Reef Decrease, LPS: Lagoon Patch Reef Survive, LPR: Lagoon Patch Reef Recovery

図 1. 1. 4 サンゴ被度経年変化表の類型区分 (礁湖・離礁)



注) 1. 数字はサンゴの被度を示す
2. CD: Channel Decrease, CS: Channel Survive, CR: Channel Recovery

図 1. 1. 5 サンゴ被度経年変化表の類型区分（水路）

(4) 考察

1) サンゴ被度変化の要因

i) 礁斜面

1983 年～1993 年頃の南及び北礁礁斜面の低被度 (SD1) は、1980 年頃からほぼ石西礁湖全域で大発生したオニヒトデによる食害の結果である。オニヒトデ駆除数は 1981 年、約 40 万匹に急激に増加した (図 1.1.6)。大発生個体群は最初、礁湖南部で観察され、礁湖北部へ移動したことが詳細に報告されている (福田・宮脇 1982)。なお、この間の嘉弥真島北岸や小浜島北岸のサンゴ高被度は、オニヒトデ駆除効果により残された群集 (SS1) である (森 1995)。オニヒトデ駆除数は 1986 年には激減し、以後、2008 年まで大発生はみられなかった (図 1.1.6)。

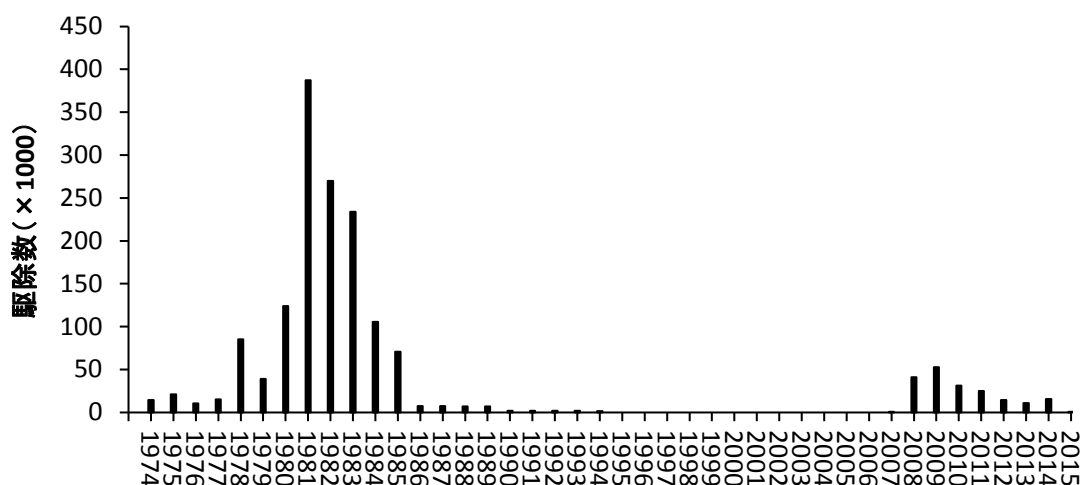


図 1.1.6 石西礁湖におけるオニヒトデ駆除数

南及び北礁礁斜面のサンゴ被度は 1993 年頃から、良好な加入のために (環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 2015)、目立って回復した。しかし、1998 年、北礁礁斜面及び新城島付近礁斜面のサンゴは夏季の白化のために衰退し、サンゴ被度は 2004 年頃まで、低被度で推移した。南礁 (ウマノハピー)・ウラビシ、では、白化の影響は比較的軽微で、北礁と対照的な様相を示した。このことは、2003 年に環境省がマンタ法で石西礁湖礁斜面を調査した結果とも一致する (図 1.1.7)。

1998 年の夏季白化は世界的な現象で、わが国でも琉球列島から本土南西海域まで、広い範囲で発生した (海中公園センター 2000)。白化の原因は、長期間に及ぶ高水温が原因で、石垣港 (石垣市登野城検潮所平均水面下 1.8m、1995 年までは毎午前 10 時測定、1996 年からは毎時測定) における石垣島地方気象台の長期間観測水温旬平均値 (1970 年～2005 年) をみると (図 1.1.8)、1998 年 8 月下旬は 30.3℃で、観測期間中で 5 番目に高い値であった。最高値は 1983 年 8 月上旬の 30.8℃で、石西礁湖で最初の白化が報告された年である (亀崎・宇井 1984)。日平均水温は、7 月 17 日に 30℃を超え、8 月 31 日

までに 30℃を超えた日が 19 日間で、特に多い年ではなかったが、八重山地方への台風の襲来がきわめて少なく、8 月 4 日に接近した 2 号以降、10 月 15 日の 10 号まで、ほぼ 2 ヶ月以上、台風の影響を受けなかった（長谷川ら 1999）。最高日水温は 30.9℃（8 月 28 日）であった。

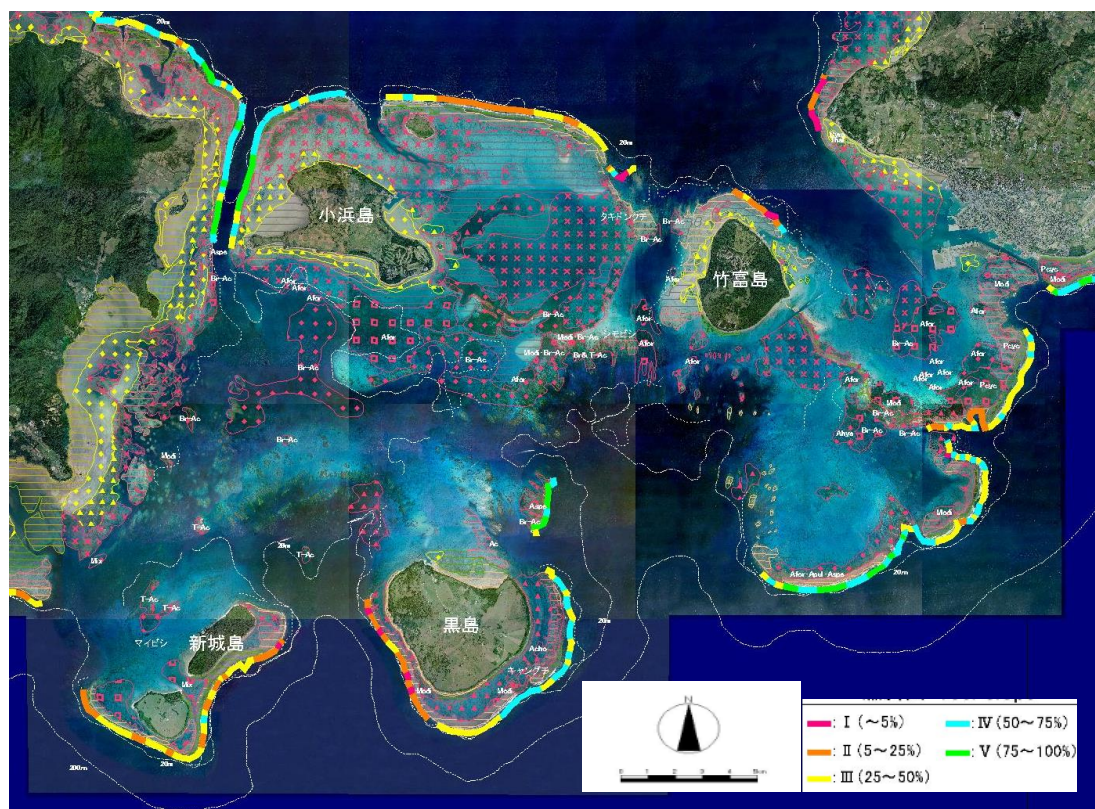


図 1.1.7 礁斜面等サング被度分布図（2003 年）
（環境省沖縄奄美地区自然保護事務所 2004）

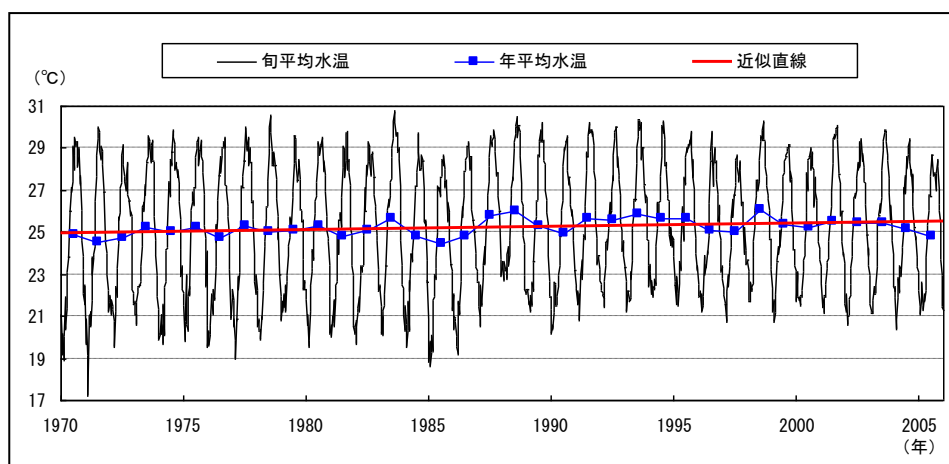


図 1.1.8 石垣港の旬平均水温（石西礁湖自然再生協議会 2007）

2007 年夏季、水温は再び上昇し、回復したサンゴ群集に白化を起こした。今度は 1998 年に白化した北礁礁斜面ではほとんど白化がみられず、サンゴ群集は高被度を維持した。一方、1998 年、白化が軽微であった南礁（ウマノハピー）・ウラビシで、今回は白化がみられた。また、新城島付近では、1998 年に引き続き今回も白化がみられた。

2005 年からは石西礁湖で通年水温観測を行っているため（環境省石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査）、北礁と南礁各礁斜面の水温変化の比較が可能である。両地点の 2007 年 4 月 1 日～8 月 31 日の日平均水温変化を図 1.1.9 に示す。水温計の設置平均水深は北礁が 3.2m、南礁が 4.0m である。月平均水温は 2007 年 7 月に極値を示し、北礁 29.90℃、南礁で 29.95℃と南礁が 0.05℃高かった。日平均 30℃以上の出現日数は北礁 15 日に対し、南礁 20 日で、31℃以上の日数は北礁 1 日に対し南礁 6 日であった。最高水温は北礁 31.02℃（7 月 27 日）、南礁 31.16℃（8 月 1 日）で、0.14℃南礁が高かった。

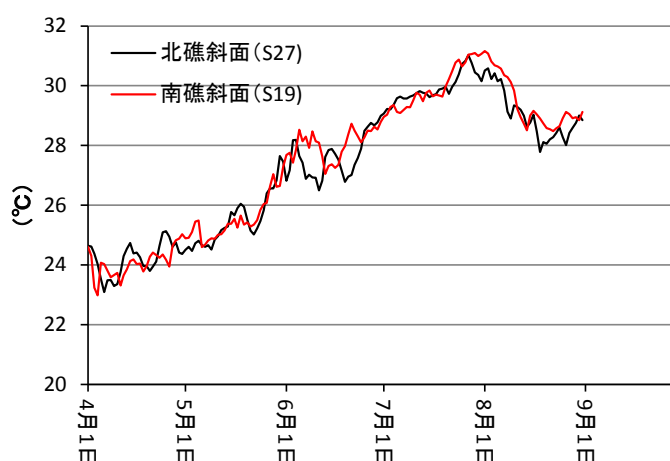


図 1.1.9 北礁と南礁の礁斜面における日平均水温変化（2007 年）

このように、南礁は北礁に比べ明らかに水温が高かったことが両者のサンゴ白化現象の差異を生じさせたとも考えられるが、1998 年の水温現象が 2007 年と逆であったかはデータがないので、不明である。水温の差がなぜ発生したかは、海流や海洋の鉛直循環等が考えられるが、八重山諸島沿岸域における物理的データが不足しているため、言及できない。

また、H27 年度業務データ（同報告書図 2.3.2-20）によれば、南礁、黒島礁斜面では 2007 年頃からオニヒトデの個体数が増加しているため、被度の減少にはオニヒトデの食害も影響しているとみられる。病気については（H27 年度業務報告書図 2.3.2-24）サンゴ被度への影響をみいだせない。白化やオニヒトデ食害のほうがより大きく被度に影響しているとみられる。

別の考え方として、北礁サンゴの高水温に対する適応の可能性がある。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）。このことは、サンゴ礁の resilience（回復力）として知られている。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、過去の高水温により白化が起こり、死滅したが、その後高い被度に回復した群集をいう。北礁礁斜面のサンゴが 1998 年の白化後、高水温に対する耐性を有したかもしれない。しかし、新城島礁斜面のサンゴは耐性を得なかった。

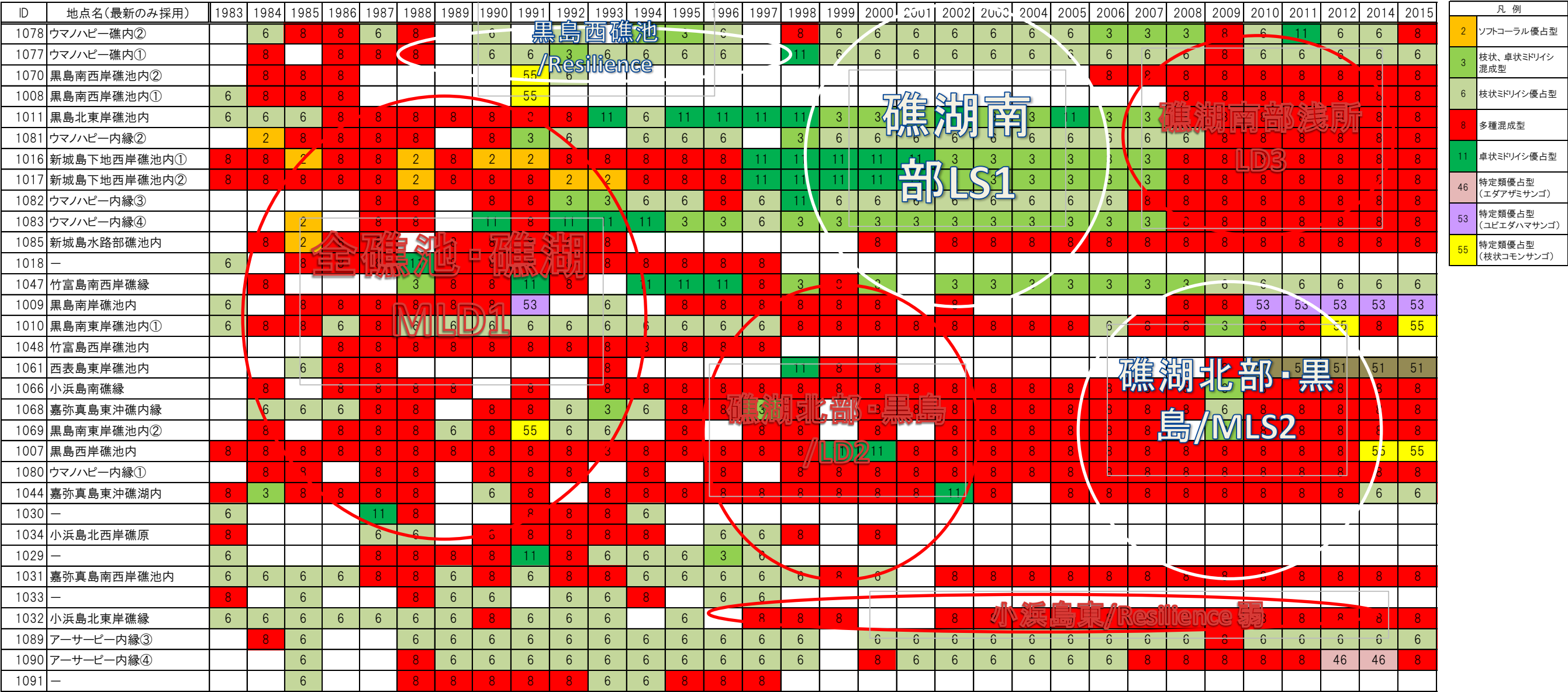
攪乱後の回復にはミドリイシ属の加入も寄与している可能性がある。H27 年度業務報告書の生育型別サンゴ被度変化表をみると攪乱による低被度時期のサンゴ群集生育形は多種混成型であるが、被度回復時期の生育型は卓状ミドリイシ優占型等、ミドリイシ類が優占している（図 1.1.10（1））。2005 年頃から北礁付近（S7、S26、S27、S28）では他の地点と異なり、ミドリイシ属の加入が連続して起こっている（図 1.1.11）。これが被度の回復に貢献した可能性がある。

ID	地点名(最新のみ採用)	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
1002	ウラビン東礁縁	8		8	8	8	8	8		8	11		8	8	8	3			3	3	11	11	3	11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1003	ウラビン北東礁縁	8	8	8	8	8	8	8	8	11	8	11	8	11	8	3				11	11	11	11	11	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	
1006	黒島北西岸礁縁	8	2	8	8	8	11	8	8	8	8	3	11	11	11	11	11	11	南礁/SS2	11	11	8	11	8	8	8	8	南礁/SS3	8	8	8	8	8	8	
1079	ウマノハピー礁縁		8	2		8	8	8	8	8	6		6	6	8			8	11	11	11	8	8	8	8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	
1084	ウマノハピー外縁①		8	8		8	8	8	11	8	11	11	南・北礁	8		8		8		11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1050	竹富島西沖離礁外縁	6	8	8		8	8	8	8	11	8	11	8	11	11	11	11	11	11	11	11	11	3	3	3	3	3	3	0	3	11	8	8	11	8
1051	竹富島北岸礁外縁	6	8	8		8	8	8	8	8	11	11	8	11	11	11	11		8	8	8	8	11	11	11	11	11	6	11	3	8	8	8	8	
1052	竹富島北東岸礁外縁	6		8		8	8	8	11	8	11	3	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	11	11	11	11	11	6	11	3	11	11	3	8	
1053	竹富島北東沖礁縁	6				3	8	3	6	11	3	3	11	6	3	3	8		8		8	8	11	8	8	8	3								
1071	嘉弥真島東沖礁外縁		8	8		8	8	8	8	8	11	11	11	11	11	11	11	8	北礁・新城	8	8	8	8	8	11	1	11	8	11	11	3	3	8	11	
1072	嘉弥真島北岸礁外縁①		3	11		11	3	3	3	8	3	11	11	11	11	8	11	8	8	8	8	8	11	11	11	11	11	6	11	3	8	8	8	8	
1073	嘉弥真島北岸礁外縁②		11	3		11	11	3	11	8	3	11	11	11	11	8	8	8	8	8	11	11	11	11	11	11	11	8	11	3	11	11	8	8	
1098	新城島上地東岸礁外縁																8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1099	新城島下地南東岸礁外縁																8	8		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1094	黒島南西岸礁外縁																8	8	8	8	11	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1103	南風見崎沖離礁外縁東																	8	8	11	11	11	11	11	11		8	8	新城/黒島	8	8	8	8	8	
1097	黒島東岸礁外縁																11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	8	
1093	ウマノハピー外縁②					11	8		8	8			8	8	8			8	2	2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1074	小浜島北岸礁外縁		11	3		8	11	8	11		6	11	11	11	11	8	11	11	11	11	11	8	11	11	11	11	11	8	11	3	8	8	8	8	
1095	黒島南岸礁外縁																8	8	8	8	11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1096	キャングチ海中公園地区																8	8	11	11	11	11	3	11	11	11	3	8	8	8	8	8	8	8	
1100	新城島下地西岸礁外縁																8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	

凡 例	
2	ソフトコーラル優占型
3	枝状、卓状ミドリイシ混成型
6	枝状ミドリイシ優占型
8	多種混成型
11	卓状ミドリイシ優占型

注)1. 数字はサンゴの生育型を示す(凡例を参照)
2. SD: Slope Decrease, SS: Slope Survive, SR: Slope Recovery

図 1. 1. 10 (1) サンゴ生育型経年変化表の類型区分 (礁斜面)



注) 1. 数字はサンゴの生育型を示す(凡例参照)
2. MLD: Moat/Lagoon Decrease, LD: Lagoon Decrease, LS: Lagoon Survive, MLS: Moat/Lagoon Survive, SR: Slope Recovery

図 1. 1. 10 (2) サンゴ生育型経年変化表の類型区分 (礁池・礁湖)

ID	地点名(最新のみ採用)	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
1067	小浜島東沖離礁①		6	8	6	8	9	0	0	8	8	8	6	8	8	11	8	8	8	8	8	8	8	8	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1023	小浜島南東岸礁縁				8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8
1027	小浜島東沖	6	6	6		6	8	8	6	6	8	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1110	小浜島東沖離礁②																8	8	8	3	8	11	8	8	8	8	8	8	0	6	8	8	8	8	8
1014	新城島上地西岸	6	8	6	8	6	2	8	8	8	8	8	2	2	2	2	2	8	11	3	11	8	11	3	3	8	11	8	3	11	3	3	11	11	
1026	ー	11	6	6	8	8	8		8	8	8	8	8	8		8	8	8	8	8	8	8													
1043	小浜島東沖礁湖内②	6			8	8	8		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	11	8	8	8	8	8	3	8	8	8	8	8	8	
1042	小浜島東沖礁湖内①	6	6			8	8	8	8	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	11	8	8	8	8	8	8	
1036	ヨナラ水道南①	6	8		8	8	8	8	3	2	2	8	11	11	8	8	8	8			6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8
1025	小浜島南東沖礁縁②	6		11	8	8	8		8	8	8	8	8	11	11	3	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1015	新城島間水路部		8	8	8	8	8	8	8	8	8	3	8	8	8	11	3	11	11	11	3	11	11	3	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
1022	黒島一小浜島間離礁①	8		8	8	6	3	3	8	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	11	11
1024	小浜島南東沖礁縁①	6	6	6		8	8		8	3	6	6	6	6	3	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6	6	6	8	8	45	8	8	8	8	8
1040	小浜島南東沖離礁①						8	8	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3	8	8	8	8	8	8
1041	小浜島南東沖離礁②	6	6				6	6		8	3	6	3	6	6	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6	6	6	8	11	8	8	8	8	8	8
1037	黒島一西表島間離礁①		8		8		2	8			2	11	11	3	6	3			6	6	3	6	6	6	8	8	8	3	8	8	8	8	8	8	8
1038	黒島一西表島間離礁②			8	8		3	3	8			3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8
1005	黒島北沖離礁②	6		8	8	11	8	8		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	3	11	3	3	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8	11
1004	黒島北沖離礁①			8	8	8	8	8	8	11	11	11	11	11	11	11	3	3	11	11	11	11	3	3	3	3	3	3	3	11	3	3	11	11	11
1039	黒島一小浜島間離礁②		8	8	8	8	8	8	3	3	3	3	8	8	6	6	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1001	ウラビシ南礁縁	8	8	8	8	8	8	8	1	11	3		8	11	8	3	8				6	6	3	3	3	8	8	8	8	1	3	3	11	3	
1013	マイビシ海中公園地区		8	2	2	8	2	8	8	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	3	3	3	8	3	1	3	8	8	8
1019	黒島北沖離礁③		6	8	11	3	11	11	11	11	11	11	3	3	3	3	3	11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8
1045	ウラビシ北離礁		8	8	8		8	8		11	11		8	11	8	8					3	11	11	11	8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	
1046	シモビシ海中公園地区	2			11	9	8	8	11	11	11		3	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	3	11	3	3	6	11
1054	竹富島東沖離礁	6	6			8	8	8	3	3	3		6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	3
1058	西表島東沖離礁①	8	2	2	2	2	2	8	8	8	8	8		8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1087	アーサービー内縁①					3	3	8	8	11	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1088	アーサービー内縁②		8				6	8	8	8	6	6	6	6	6	6	3	6	6	6	3	6	6	8	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1108	ヨナラ水道南沖離礁																6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1109	竹富島南沖離礁①																11	11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8
1111	小浜島南東沖離礁③																6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8
1115	ウマノハピー礁内④																	11	3	11	3	3	3	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1104	新城島一西表島間離礁②																11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	8	2	8	8	8	8	8	8	8
1101	新城島北西沖離礁																2	8	8		11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1102	新城島一西表島間離礁①																8	8	2	2	8			8	8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	8
1106	黒島北西沖離礁																3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8	8	8	8	8	8	8	8
1076	アーサービー外縁		8		3	8	8		3	6	11	6	6	6	6	6	8	6	8	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1059	西表島東沖離礁②	8	6		6		6	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6	6	6	6	6	6
1021	黒島-小浜間の離礁	2	8	8			8	8	11	11	11	11	11	11	3	3	3	8	8																
1020	黒島北沖離礁④		8	8	8	8	8	8	8	8	11	11	11	11	3	11	11	11	11	3	3	2	3	3	3	3	3	3	6	3	11	3	3	11	11
1060	西表島東沖離礁③	8	6	6	6	6	8	6	8	6	6	6	8	8	8	8	6	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	55	6	6	6	6	6	6	6
1107	小浜島南沖離礁																8	6	6	3	6	3	3	8	8	8	8	11	8	8	8	8	8	8	8
1113	西表島仲間崎沖離礁																	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	8	8	8	8	8	8
1114	竹富島南沖離礁②																	11	11		11	11	11	3	8	8	8	11	8	8	8	8	8	8	8
1105	黒島-新城島間大型離礁																11	11	11	8	11	11	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	8	8	8

凡 例	
2	ソフトコーラル優占型
3	枝状、卓状ミドリシ混成型
6	枝状ミドリシ優占型
8	多種混成型
11	卓状ミドリシ優占型
45	特定類優占型 (アナサンゴモドキ)
53	特定類優占型 (ユビエダハマサンゴ)
55	特定類優占型 (枝状コモンサンゴ)

注)1. 数字はサンゴの生育型を示す(凡例参照)
2. LPD: Lagoon Patch Reef Decrease, LPS: Lagoon Patch Reef Survive, LPR: Lagoon Patch Reef Recovery

図 1. 1. 10 (3) サンゴ生育型経年変化表の類型区分 (離礁)

ID	地点名(最新のみ採用)	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	凡 例						
1028	嘉弥真島南岸礁縁	8	6	8	6	6	6	6	6	6	6	6	2	8	8	6	8	8	8	8	水路/CD2	8	8	8	8	8	8	8	8	2	8	8	8	8	8	8	2	ソフトコーラル優占型				
1049	竹富島西沖離礁礁縁	6	6	8		8	8	8	8	8	11	3	11	11	11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	6	3	51	3	11	3	6	11	11	6	3	枝状、卓状ミドリイシ混成型					
1062	ヨナラ水道南②	8	2		11	2	2	2	2	8	8	8	11	8	8	6			3	6	6	6	6	6	6	6	6	11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	枝状ミドリイシ優占型			
1063	ヨナラ水道南部	6	8	2	水路/CD1					2	2	2	2	水路/CR1	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	11	6	6	6	6	6	6	6	6	6					
1064	ヨナラ水道中央部①	8		2	8	8	8	2	8	8	8	11	11	3	3	3	6	6	6	6	水路/CS1	6	6	6	6	6	6	6	11	水路/CS2					6	6	6	6	6	6	8	多種混成型
1065	ヨナラ水道北部	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	11	11	3	3	3	6	6	3	6	6	6	6	6	6	6	6	11	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8				
1035	ヨナラ水道南礁縁	8	8	2	2	2	8	2	8	2	2	8	8	8	2	3	3	6	6	6	6	6	6	3	3	3	3	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	11	卓状ミドリイシ優占型	
1075	ヨナラ水道中央部②		8	8	8	2		8	8	8	8	8	11	11	3	11	3	11	11	11	11	11	8	水路CD3					8	8	3	8	8	8	45	45	45	45				
1112	タキドンチ海中公園地区																3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6	6	6	6	6	8	6	8	8	51	特定類優占型 (ハマサンゴ・キクメイシ)			

注) 1. 数字はサンゴの生育型を示す(凡例参照)
2. CD: Channel Decrease, CS: Channel Survive, CR: Channel Recovery

図 1. 1. 10 (4) サンゴ生育型経年変化表の類型区分 (水路)

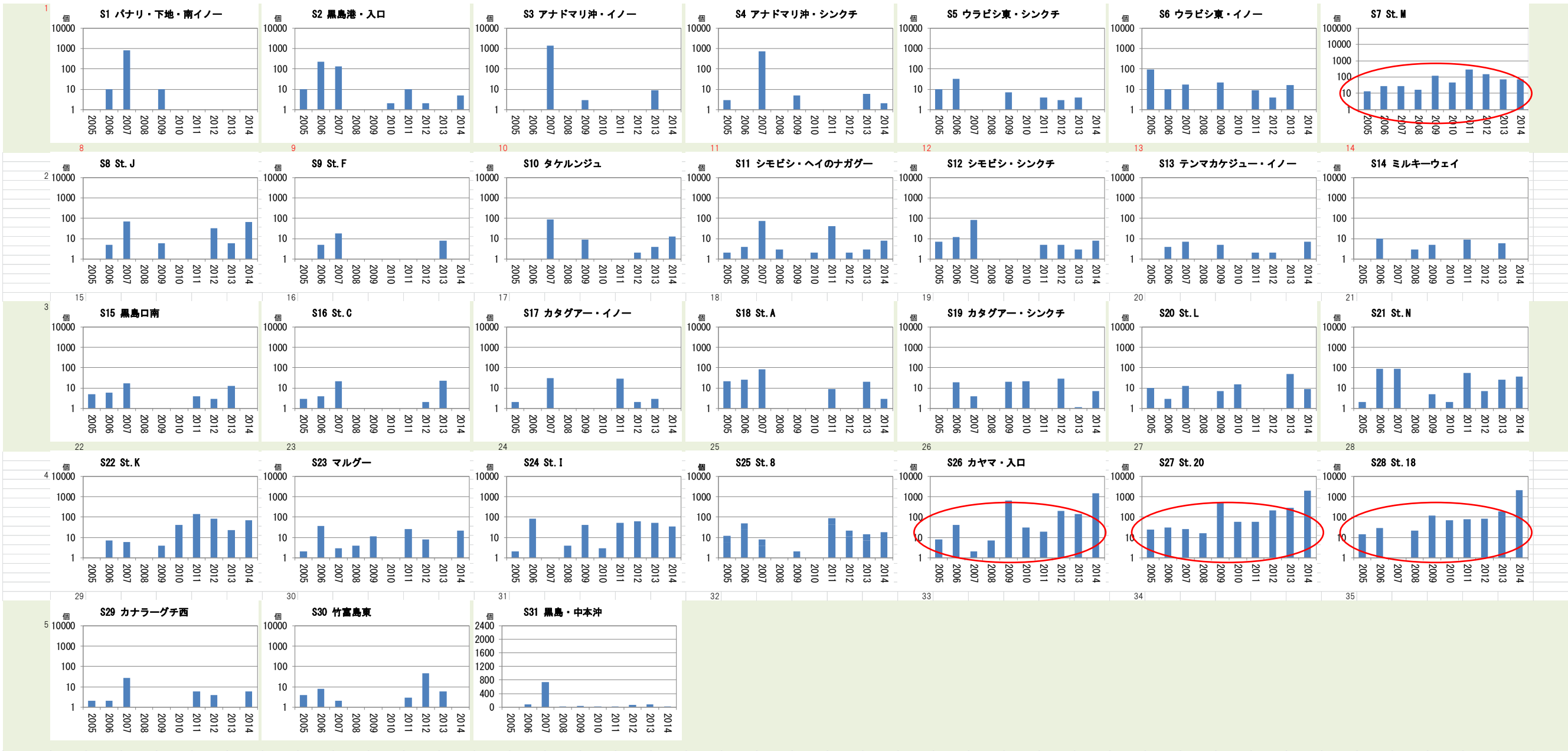


図 1. 1. 11 石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査加入調査結果（2005-2014；ミドリイシ属）
（H27 年度業務報告書、図 2. 3. 3-5 を改変：Y 軸を対数表示）

ii) 礁池・礁湖内縁

礁池・礁湖内縁においても、1983年頃～1993年頃、大半の地点でサンゴ被度の低下みられた（MLD1）。礁斜面と同様に石西礁湖全域で大発生したオニヒトデの食害によるものである。大発生のピークであった1981年の10～11月オニヒトデ分布とサンゴの食害状況をみると、食害は礁湖南部から礁湖・礁池をなめるように進行した様子がわかる（図1.1.12）。その後、ほぼ石西礁湖全域が食害されたことは礁斜面の項で述べたとおりである。なお、黒島南西側礁池はあまり食害を受けなかったと思われる。図1.1.12からもその様子がうかがえる。図1.1.12の食害域の南には複数の^{わたんち}渡地（礁池を横切る梁状の干出礁原。大潮干潮時には岸から礁縁まで歩行可能）があるため、オニヒトデの進行を阻んだのかもしれない。そのためか、回復が早く（Resilience）、1987年頃、急激に高被度に達した。1991年のサンゴ礁分布調査結果によれば、黒島南西側礁池は黒島礁池では唯一のサンゴ高被度域（50%以上）となっており、分布サンゴは枝状コモンサンゴとなっている（環境庁 1996）。枝状コモンサンゴは成長が早いことが知られており、そのため、回復が早かったと思われる。しかし、この群集は2007年の夏季高水温による白化のため急速に衰退した。

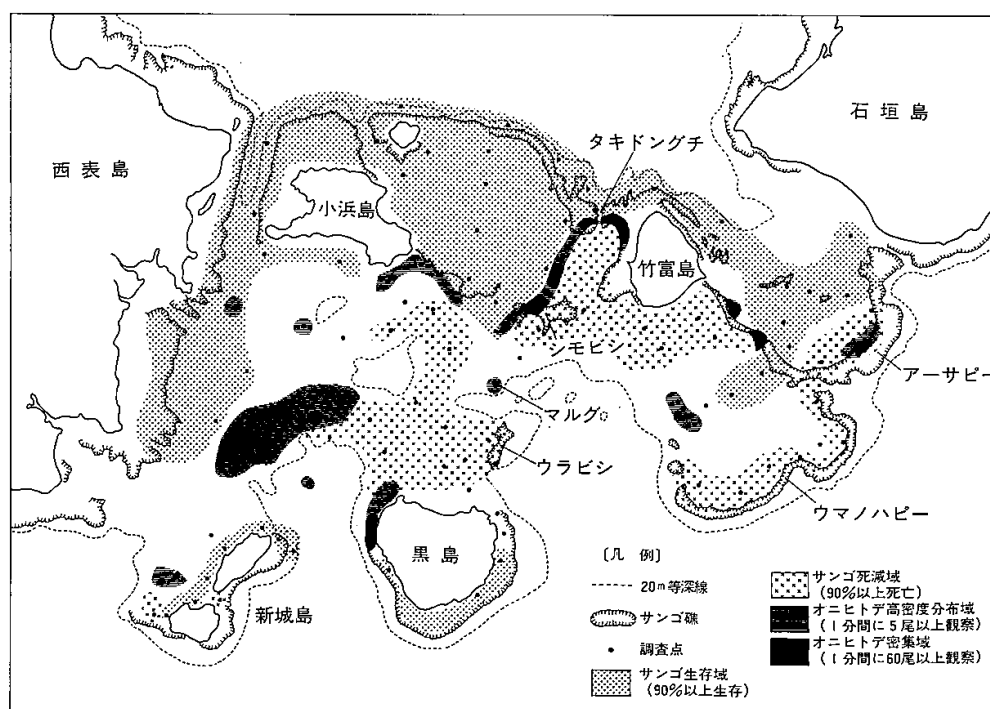


図 1.1.12 1981 年 10～11 月におけるオニヒトデ分布及び食害状況（福田・宮脇 1982）

1993年頃から礁湖南北では被度の回復がみられたが、黒島西岸礁池では2003年まで低被度で推移した。礁池特有の回復力が弱い要素（加入が乏しい）が原因と考えられる。1998年頃～2003年頃、礁湖北部及び黒島では被度の低下がみられた。1998年の夏季高水温による白化がその大きな要因である。一方、礁湖南部では、南礁礁斜面と同様にサンゴ被度

の大きな低下はみられなかった。2007 年夏季は高水温となり 2007 年頃～2013 年、今度は礁湖南部浅所でサンゴ被度の低下がみられたが、北礁斜面が軽微であったように礁湖北部も被度の低下は軽微であった。また、黒島南岸、南東岸礁池も軽微であった。

また、H27 年度業務報告書（報告書図 2.3.8-5）によれば、礁湖南部では 2008 年～2009 年、2500 個体以上のオニヒトデを駆除しているため、被度の減少にはオニヒトデの食害も影響しているとみられる。病気については（H27 年度業務報告書図 2.3.2-24）サンゴ被度への影響をみいだせない。白化やオニヒトデ食害のほうがより大きく被度に影響しているとみられる。

なお、小浜島東海域では、1983 年～1990 年、オニヒトデの食害の影響を受けず、サンゴ高被度群集は生残したが（海中公園センター八重山海中公園研究所 1993）、1992 年頃から被度が低下し始め、1996 年以降は低被度のまま推移している。極めて回復力が乏しい海域となっている。

iii) 礁湖離礁

礁湖離礁においても、1983 年頃～1993 年頃、大半の地点でサンゴ被度の低下みられた（LPD1）。礁湖内縁と同様に石西礁湖全域で大発生したオニヒトデの食害によるものである。1992 年頃からサンゴ被度は回復したが（LPR1）、小浜島東側では回復が進まず、1998 年の夏季高水温による白化の影響を受け、2002 年頃まで低位に推移した。一方、礁湖南部では、1998 年の高水温による白化の影響は軽微であったが、2007 年の高水温では白化によりサンゴ被度は低下した。

前項と同様に、H27 年度業務報告書（報告書図 2.3.8-5）によれば、礁湖南部では 2008 年～2009 年、2500 個体以上のオニヒトデを駆除しているため、被度の減少にはオニヒトデの食害も影響しているとみられる。病気については（報告書図 2.3.2-24）サンゴ被度への影響をみいだせない。白化やオニヒトデ食害のほうがより大きく被度に影響しているとみられる。

なお、小浜島東海域では、1983 年～2013 年、低被度のまま推移している。極めて回復力が乏しい海域となっている。

iv) 水路

ヨナラ水道では、1983 年～1992 年頃、前項と同様に、オニヒトデ食害により、サンゴ群集は低被度であったが（CD1）、1993 年頃、回復がみられた（CR1）。その後は、1998 年、2007 年の高水温はサンゴ被度に大きな影響を及ぼさなかった（CS1、CS2）。一方、カヤマ水路では、1993 年、白化の影響を受けて（海中公園センター八重山海中公園研究所 1993）、サンゴ被度は低下し、2011 年まで、低位で推移した（CD2）。小浜島東海域に近く、回復力が乏しい。タキドングチ海域公園地区は、2004 年～2007 年、低被度であった（CD3）。これは、サンゴ食巻貝による食害が原因であるが（環境省自然環境局・自然環境研究セン

ター 2005)、良好な加入により、被度の回復は速やかであった。ヨナラ水道やタキドングチのような水路では、潮流が速いため、サンゴに対する温度の影響が異なると思われる。水温が上昇しても、流れの速さにより、サンゴが白化しにくく、また白化から回復しやすいことが報告されている (Nakamura, T et al. 2003)。

2) 他の解析との比較

広域モニタリング調査におけるサンゴ被度の変化の解析は、環境省過年度業務においても行われている (環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 2015)。H24 年度までのデータから解析した変遷パターン (図 1.1.13) によれば、2006 年度以降、礁湖北部やヨナラ水道で被度が増加し、礁湖南部で減少し、また、小浜島東部で低位で推移している傾向がみてとれ、本業務の結果とおおむね一致している。

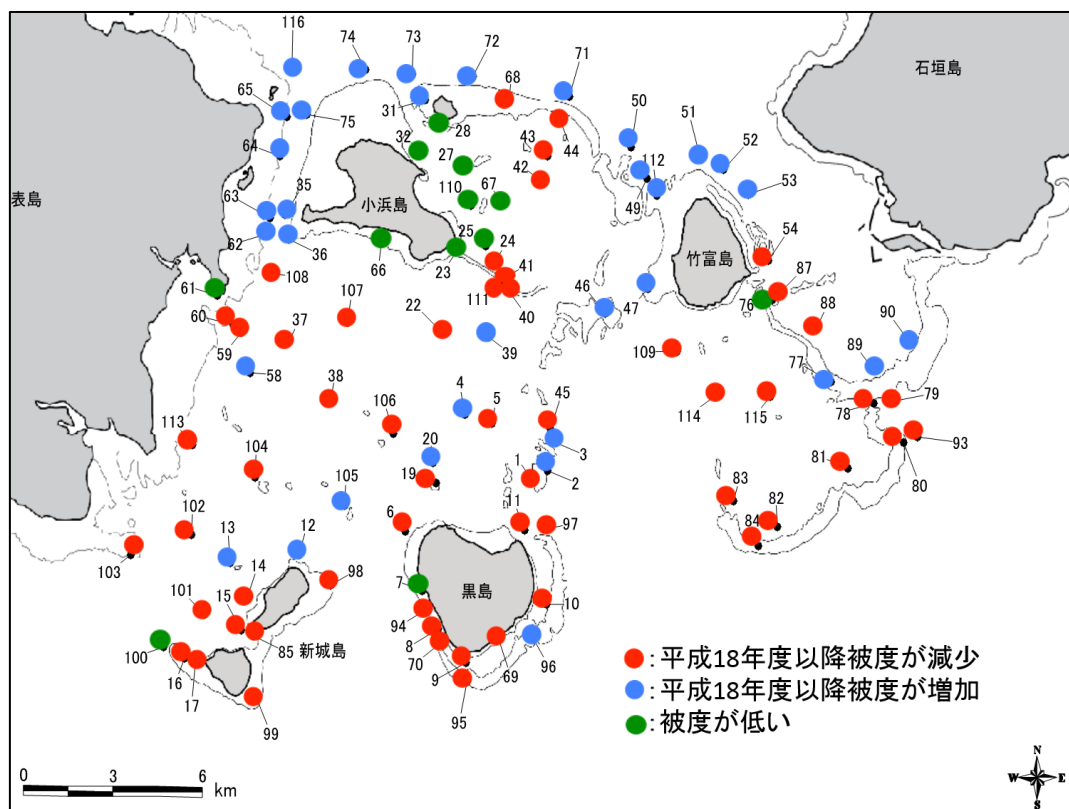


図 1.1.13 平成 24 年度までのデータから解析した被度の変遷パターン
 (環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 2015)

また、広域モニタリングの 1998 年～2013 年のサンゴ被度データをクラスター解析することにより、変動パターンを「高被度グループ」、「低被度グループ」、「減少グループ」に分けた結果では (図 1.1.14)、礁湖北部、ヨナラ水道を高被度域、礁湖南部を減少域、小浜島東側海域を低被度域としており、本業務の結果とおおむね一致している。

以上の結果から、本業務における可視化による解析方法は妥当であると考えられる。

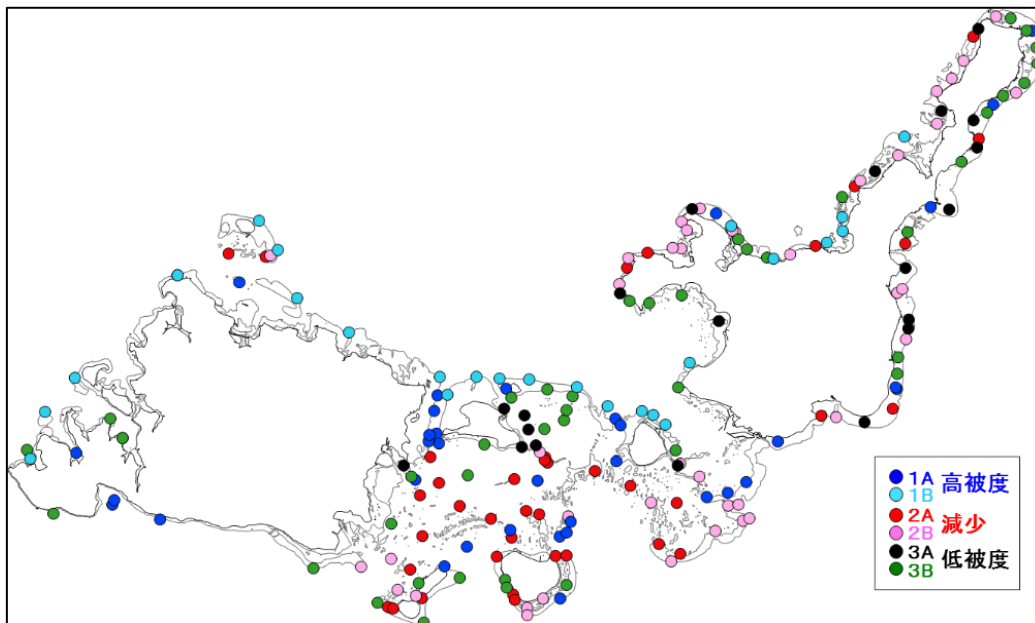


図 1.1.14 クラスタ解析で類別化された 3 つのグループの空間分布
(灘岡ら 2016)

(5) 課題

解析の結果、いくつかの課題があげられる。

①調査地点配分

礁湖に 100 地点以上の多数の地点を配分しており、礁湖の動態を把握するには十分な配置と考えられるが、南礁（アーサーピー、ウマノハピー）礁斜面の地点が 3 地点しかなく、やや手薄な感じが否めない。八重山諸島南部には、高水温期、西向きの海流があり（田村ら 2005）、石西礁湖南部と石垣島南部から幼生供給の連関性が報告されている。また、過去のオニヒトデ大発生が礁湖南部から起こったことも知られており、この海域をモニターすることは礁湖の変動を早期に察知するうえで、重要である。そのため、アーサーピーに 2 地点、ウマノハピーに 1 地点を加えることを提案したい。

②生育型の区分

現在、生育型は 6 タイプに区分されている。この中で、データを解析する際に情報が十分でないのが、「多種混成」である。多種混成はどのような種構成なのか。「特定のイシサンゴ」の場合、種名が記載されているためわかりやすいが、多種混成の場合、群集の遷移の段階（低被度段階）で多種が生息しているのか、鉛直方向の調査範囲（水深）を大きくとったため、多種が出現するのか、読者には不明である。例えば、St.3（ウラビシ離礁礁縁）の場合、調査範囲は水深 3～10m で大きい。2013 年の場合、被度 50.0% でタイプは多種混成である。この場合、卓状ミドリイシにコリンボース状ミドリイシが

混生しているのか。そのような場合、コリンボース状ミドリイシを記載するとわかりやすい（モニタリングサイト 1000 各年度報告書巻末の海中景観写真キャプションに記載されているので、調査結果一覧表にも記載するとわかりやすい）。

引用文献

- 福田照雄・宮脇逸朗（1982）八重山群島石西礁湖海域におけるオニヒトデの異常発生について、海中公園情報（56）：10-13.
- 長谷川 均・市川 清士・小林 都・小林 孝・星野 眞・目崎茂和（1999）石垣島における 1998 年のサンゴ礁の広範な白化、Galaxea, JCRS, 1:31-39.
- 海中公園センター（2000）平成 10 年度造礁サンゴ群集の白化が海洋生態系に及ぼす影響とその保全に関する緊急調査報告書（環境庁委託調査）、201pp.
- 海中公園センター八重山海中公園研究所（1993）平成 5 年度石西礁湖及びその近隣海域におけるオニヒトデ及びサンゴ類の分布調査報告書.
- 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.
- 環境庁（1996）サンゴ礁分布図その 4 先島諸島、第 4 回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査（1989-1992）.
- 環境省沖縄奄美地区自然保護事務所（2004）平成 15 年度石西礁湖自然再生調査（サンゴ群集分布調査）業務報告書.
- 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2015）平成 26 年度石西礁湖サンゴ礁攪乱要因モニタリング調査業務報告書.
- 環境省自然環境局・自然環境研究センター（2005）平成 16 年度西表国立公園石西礁湖及び近隣海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書.
- 森 美枝（1995）石西礁湖におけるイシサンゴ類とオニヒトデの推移、海中公園情報（107）：10-15.
- 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.
- Nakamura, T et al.（2003） Water flow facilitates recovery from bleaching in the coral *Stylophora pistillata*, Mar Eco Prog Ser, 256:287-291.
- 灘岡和夫ら（2016）数値シミュレーションモデル解析と現地調査に基づく「島嶼—サンゴ礁—外洋」統合ネットワーク系の構造解析、島嶼—サンゴ礁—外洋統合ネットワーク系動態解明に基づく石西礁湖自然再生への貢献、環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書：1-30.
- 石西礁湖自然再生協議会（2007）石西礁湖自然再生全体構想、68pp.
- 田村 仁ら（2005）沖縄・石西礁湖自然再生計画立案のための熱・物資輸送数値シミュレーション、海岸工学論文集 52：1161-1165.

付. モニタリングサイト 1000 調査マニュアル

1. 調査地点

図 1.1.15 に示す石西礁湖 102 地点（2016 年度）。

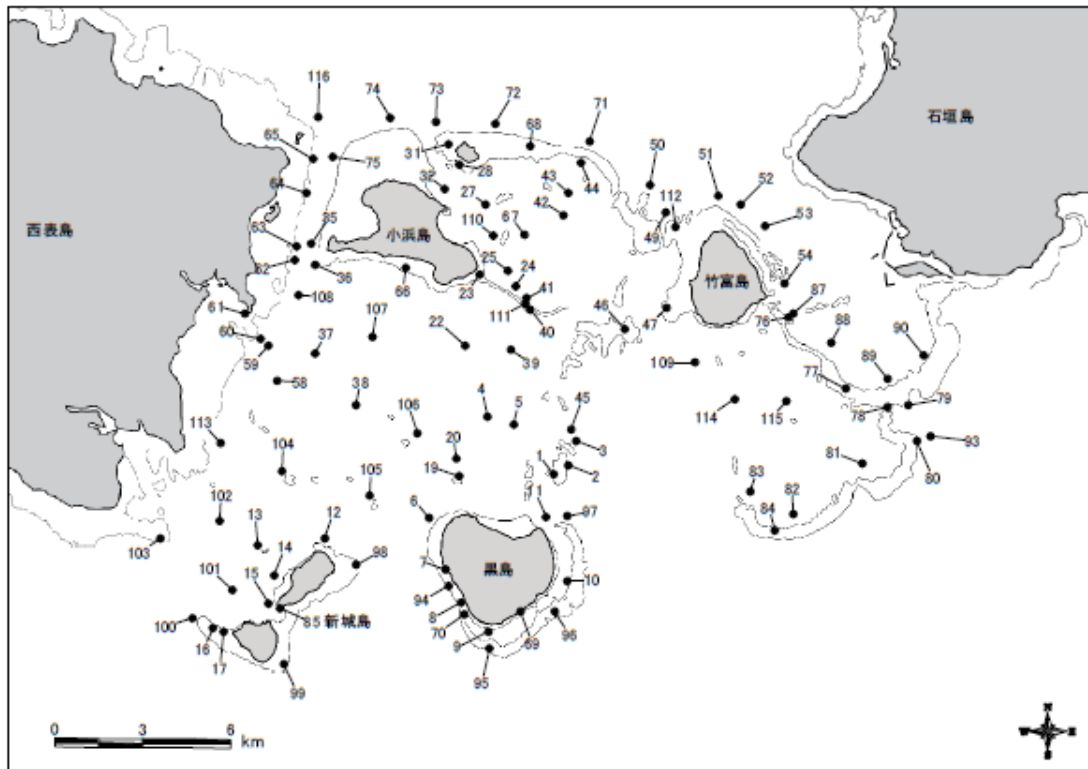


図 1.1.15 モニタリングサイト 1000 調査地点

2. 調査頻度

年 1 回（1983 年～）

3. 調査項目及び調査手順

調査地点における調査員 2 名の各 15 分間スノーケリングによる目視観察。必要に応じて底質を採取、SPSS 測定法を用いて赤土含有量を計測。各地点の代表的な場所で、景観の特徴を記録するため写真を撮影。

(1) 調査対象生物

「サンゴ」及び「ソフトコーラル」

「サンゴ」とは次の分類群の総称

- ・ヒドロ虫綱アナサンゴモドキ目全種
- ・花虫綱八放サンゴ亜綱根生目のうちのクダサンゴ

- ・花虫綱八放サンゴ亜綱アオサンゴ目（本邦産アオサンゴ 1 種のみ）
- ・花虫綱六放サンゴ亜綱イシサンゴ目全種

「ソフトコーラル」とは次の分類群の総称

- ・花虫綱八放サンゴ亜綱根生目のうちクダサンゴ（1 属 1 種）を除く全種及びウミトサカ目全種 1

(2) 調査項目

1) サンゴの生育状況

①サンゴ被度及び生育型

サンゴ被度は、調査地点の底質のうち、サンゴの着生基質となりうるものに対して生きているサンゴが占める割合（ソフトコーラルは含まない）。砂や泥等のサンゴの着生基質とならない底質部分は対象外とした。被度はパーセントで記録した。

2 名の調査員は各々15 分の調査時間を 5 分ごとの調査単位に分け、それぞれの調査単位について目視で見積もったサンゴの被度を記録した。その上で、調査員 2 名の合計 6 調査単位の単純平均をその地点のサンゴ被度とした。

サンゴ生育型は、各調査員各 5 分の調査単位についてサンゴ群集の生育型を記録した。調査員 2 名の合計 6 調査単位で、原則として最も出現頻度が高かった生育型をその地点の代表的な生育型とした。異なる生育型が同程度の頻度で出現する場合は、その都度検討を行い、地点の生育型を決定した（例えば、Ⅰ型とⅢ型が同程度の頻度である場合はⅡ型とした）。なお、ソフトコーラル優占型の場合も、サンゴ被度にはソフトコーラルの被度は含めていない（表 1.1.1）。

表 1.1.1 サンゴ生育型

生育型	群集の状況
Ⅰ	枝状ミドリイシ優占型（枝状ミドリイシ類の割合が60%以上）
Ⅱ	枝状・卓状ミドリイシ混成型
Ⅲ	卓状ミドリイシ優占型（卓状ミドリイシ類の割合が60%以上）
Ⅳ	特定類優占型（ミドリイシ類以外の特定のイシサンゴ類が優占する）
Ⅴ	多種混成型（多種のサンゴが混在し、特定の種が優占しない）
Ⅵ	ソフトコーラル優占型（ソフトコーラルが最も優占する）

②卓状ミドリイシ類の最大長径

各調査員は大きい順に5群体の卓状ミドリイシ類の長径を測定した。調査員2名の合計の値を平均し、当該地点の卓状ミドリイシ類の最大長径とした。

③ミドリイシ類の新規加入

各調査員が、15分間の調査時間中に、大型のサンゴ群体が少なく岩盤の露出面が多

い場所において、目測で仮想の方形枠（1m×1m）を設定し、その中の直径5cm未満のミドリイシ属の加入群体数を記録した。これを3か所で行い、3か所分の値を平均した値を当該地点のミドリイシ類の新規加入数とした。

2) サンゴの攪乱要因

①オニヒトデ

15分間の調査時間中に各調査員が観察したオニヒトデの個体数を記録し、2名の調査員の平均値を当該地点の「15分間観察個体数」、合計を「総観察個体数」とした。実際の調査では、卓状ミドリイシ類の下や穴に隠れていることが多いため、食痕を見つけた場合は素潜りで潜水して、オニヒトデの存在を確認した。

また、出現したオニヒトデの直径（腕の端から反対側の腕の端まで）を20cm未満、20cm以上30cm未満、30cm以上の3階級に分類し、優占（最も多い）サイズ階級を求めた。さらに、サンゴ全体に対する、明らかに最近オニヒトデに食害されたと分かる（骨格が白く見える）サンゴの割合の概数を食害率として記録した。

②サンゴ食巻貝

15分間の調査時間中に各調査員が観察したシロレイシガイダマシ類（アクキガイ科シロレイシガイダマシ属*Drupella*の小型巻貝類）の発生状況を表1.1.2の階級で記録した。

表1.1.2 サンゴ食巻貝発生階級

階級	発 生 状 況
I	食痕（新しいもの）は目立たない
II	小さな食痕や食害部のある群体が散見
III	食痕は大きく、食害部のある群体が目立つが、数百個体以上からなる密集した貝集団はみられない
IV	へい死群体が目立ち、密集した貝集団が散見される

調査員2名によって得られたデータのうち、階級が高い方をその調査地点の代表値とした。また、サンゴ全体に対する、明らかに最近サンゴ食巻貝に食害されたと分かる（骨格が白く見える）サンゴの割合の概数を食害率として記録した。

③サンゴの白化現象

15分間の調査時間中に各調査員が、白化前まで生存していたと思われるサンゴ全体に占める白化したサンゴもしくは白化後死滅したサンゴの割合を記録し、2名の調査員の平均値を白化率とした。また、サンゴ全体とは別に、白化の影響を受けやすいミドリイシ類についても同様に記録した。白化率は次に示す式の通りである。

$$\text{白化率(\%)} = \frac{(\text{白化後死滅したサンゴ}) + (\text{白化したサンゴ})}{(\text{白化後死滅したサンゴ}) + (\text{白化したサンゴ}) + (\text{白化していない生サンゴ})} \times 100$$

④サンゴの病気の発生状況

サンゴに発生する病気のうち腫瘍、黒帯病及びホワイトシンドロームの3種（表1.1.3）について、その有無を記録した。

表1.1.3 サンゴの病気の症状

病気の種類	主な症状
腫瘍	群体表面に、瘤状の骨格異常が形成される。
黒帯病	軟組織にシアノバクテリアが侵入繁殖し、黒い帯状となって組織の壊死が起こる。
ホワイトシンドローム	卓状ミドリイシ類でよくみられ、ケーキを切り分けていくような形で徐々に死亡していく。死亡した部分は海藻が覆い、生きている部分との境に白い帯状の部分がみられる。

3) 物理環境

①位置：調査地点の中心付近の緯度経度をGPSで計測して記入した。なお、緯度経度は世界測地系（WGS-84測地系）を使用した。

②地形：調査地点の地形的環境を、礁池、離礁、礁原、礁斜面に分類して記録した。

③底質：海底面の状態を、岩（サンゴ岩）、礫（サンゴ礫）、砂/礫、砂、泥に分類し、占める範囲の多いもの（上位2つ）を記録した。

④観察範囲：観察範囲は地形やサンゴ群集の広がり方等によって異なるが、観察した範囲のおおよその面積（㎡）を記録した。

⑤水深範囲：15分間の遊泳範囲では起伏の変化が大きいため、観察域の水深（m）範囲を目測で記録した。

⑥シルトの堆積（SPSS）

SPSSは（content of Suspended Particles in Sea Sediment）の略語であり、底質中懸濁物質含有量を意味する。本調査では、沖縄県衛生環境研究所赤土研究室が赤土汚染の程度を推定する目的で考案した手法（SPSS簡易測定法）を用いて測定する。調査地点の底質を採集して実験室に持ち帰り、試料を希釈した際の透視度を測定して懸濁物質含量を算出した。算出結果は以下の9つの階級に分類して記録した（表1.1.4）。

表1.1.4 SPSS階級

階級	SPSS (kg/m³)	階級	SPSS (kg/m³)
1	<0.4	5b	30≤, <50
2	0.4≤, <1	6	50≤, <200
3	1≤, <5	7	200≤, <400
4	5≤, <10	8	400≤
5a	10≤, <30		

沖縄県衛生環境研究所では、階級6以上（SPSSが50kg/m³以上）は、明らかに人為的な赤土等の流出による汚染、階級5b（SPSSが30～50kg/m³）で透明度が悪くなり、サンゴ被度に悪影響が出始めるとみなしている。

透視度から微粒子の含有量を算出する計算式は、次のとおりである。

$$C = \{ (1718 \div T) - 17.8 \} \times D \div S$$

C：底質中の微粒子の含有量（kg/m³）

T：透視度（cm）

S：測定に用いた試料量（ml）

D：希釈倍＝500／分取量

調査では、十分な量の堆積物が存在しない調査地点や十分な量の堆積物が存在していても調査範囲の水深から大きく外れていた場合は、この調査を実施しなかった。

4) 大型定着性魚類

水産資源量の目安として、大型定着性魚類のうち全長30cm以上のハタ類、ベラ類、ブリダイ類の個体数及び分かる範囲で種名を記録した。なお、各魚類の観察個体数は、調査員2名のうち多い値を採用した。

5) 特記事項

調査中に気が付いたこと、特異なことを記録した。