

1.4.3 水質モニタリングデータの解析

(1) はじめに

H27 年度業務において、石西礁湖に係る過年度業務の広域水質調査データが整理された。そこで、本項では、石西礁湖への攪乱が海域的に区分され、今後の保全再生対策を適切に進めることができるよう、整理されたデータの解析を行うとともに環境省の石西礁湖海洋観測ブイの測定データもあわせて解析した。

(2) 方法

石西礁湖における水質調査は、広域調査と定点調査が実施されてきた。広域調査は礁湖全域に調査地点が配置されているが、時間的に系統的に調査は行われていない。一方、定点調査は、1 地点であるが観測ブイを設置し、連続的に測定が行われている。これらのデータの中で経年変化の検討可能なものについて、可視化し、解析を行った。

解析したデータの出典を次に示す。

- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・いであ株式会社（2009）平成 20 年度石西礁湖サンゴ礁保全総合調査業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・いであ株式会社（2010）平成 21 年度石西礁湖サンゴ礁保全総合調査業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・いであ株式会社（2011）平成 22 年度石西礁湖サンゴ礁保全総合調査業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2012）平成 23 年度石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2013）平成 24 年度石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査等業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2014）平成 24 年度（繰越）石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査等業務報告書
- ・ 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群集モニタリング調査等業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2016）平成 27 年度石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査等業務報告書
- ・ 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所（2014）平成 25 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

(3) 結果

1) 広域的調査

調査地点は、図 1.4.3.1 に示すとおりである。調査項目としては、陸域からの負荷で水質悪化をもたらす栄養塩を主体に測定が行われた。栄養塩は赤土とともにサンゴ礁環境攪乱負荷源として、主要なものとして知られている。栄養塩の増加は褐虫藻の増殖を促し、光合成量に貢献するものの、栄養塩負荷が藻類の増殖を促すことから、生息場の競合等、サンゴ礁生態系に影響を及ぼすと考えられている。また、サンゴの病気を起こす病原菌の増殖を起こす可能性やサンゴ白化が栄養塩濃度の高い海域ほど顕著であったことが知られている（田中 2012）。

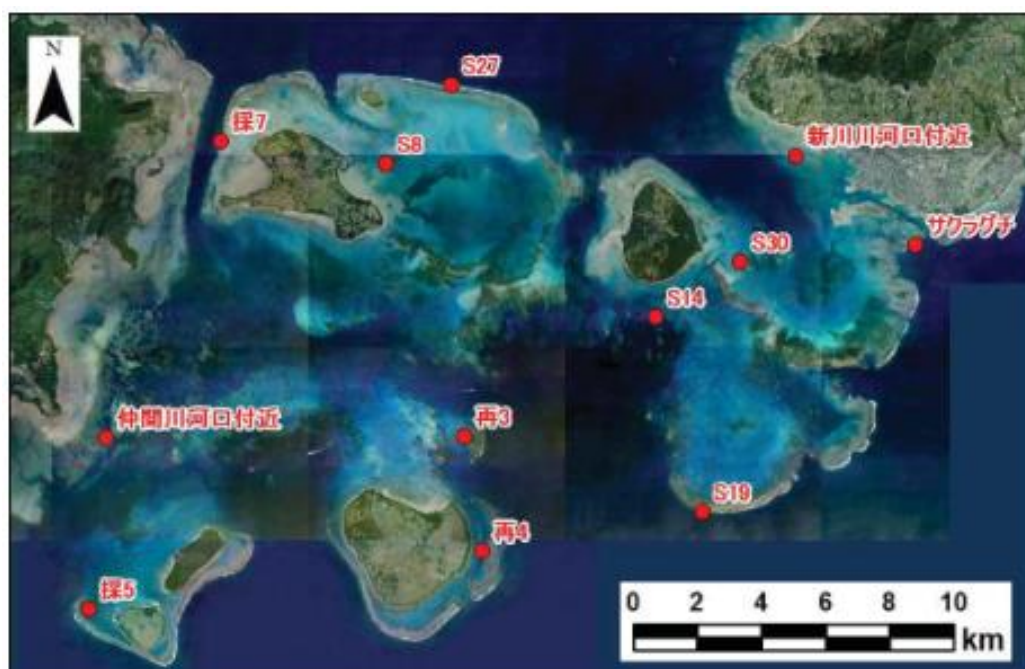


図 1.4.3.1 水質調査地点

栄養塩は様々な項目が測定されているが、サンゴ礁は本来貧栄養の水質環境のため、測定項目によっては地点間の差異を示す値が得られないことも多い。ここでは、生活や産業活動の結果、サンゴ礁への負荷源となる窒素について解析した。

これまでの測定で、溶存態窒素（TDN）の大半は有機態窒素（DON）であることがわかっている（図 1.4.3.2）。有機態窒素は生物の排泄物や遺骸由来のもので、分解が進んだ状態である。さらに進むとアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）となり、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）へと硝化される（図 1.4.3.3）。したがって、DON が主である石西礁湖の水質は硝化の進んでいない状態を示している（図 1.4.3.2）。

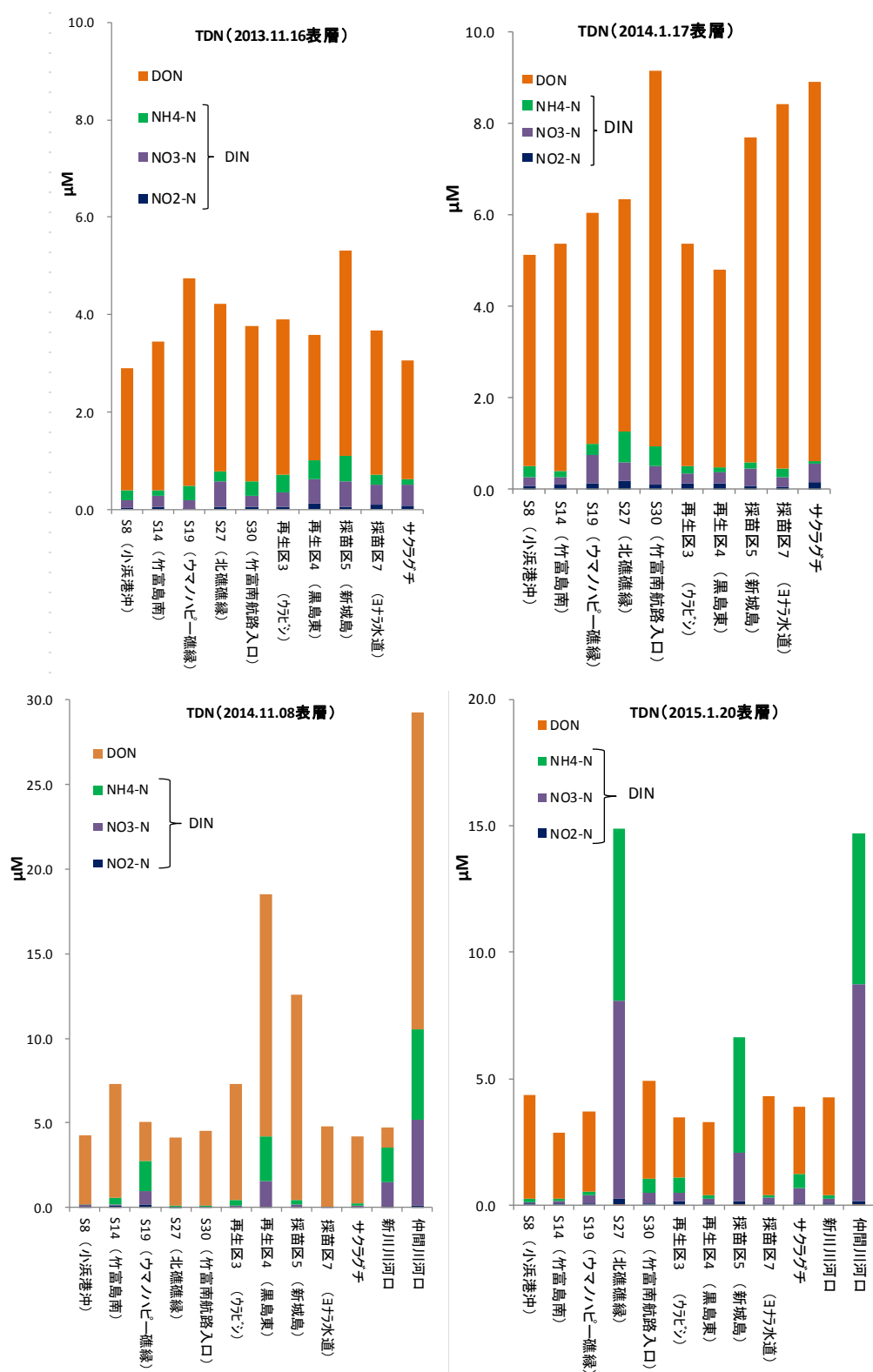


図 1.4.3.2 石西礁湖における溶存態窒素
(2013 年～2015 年測定)

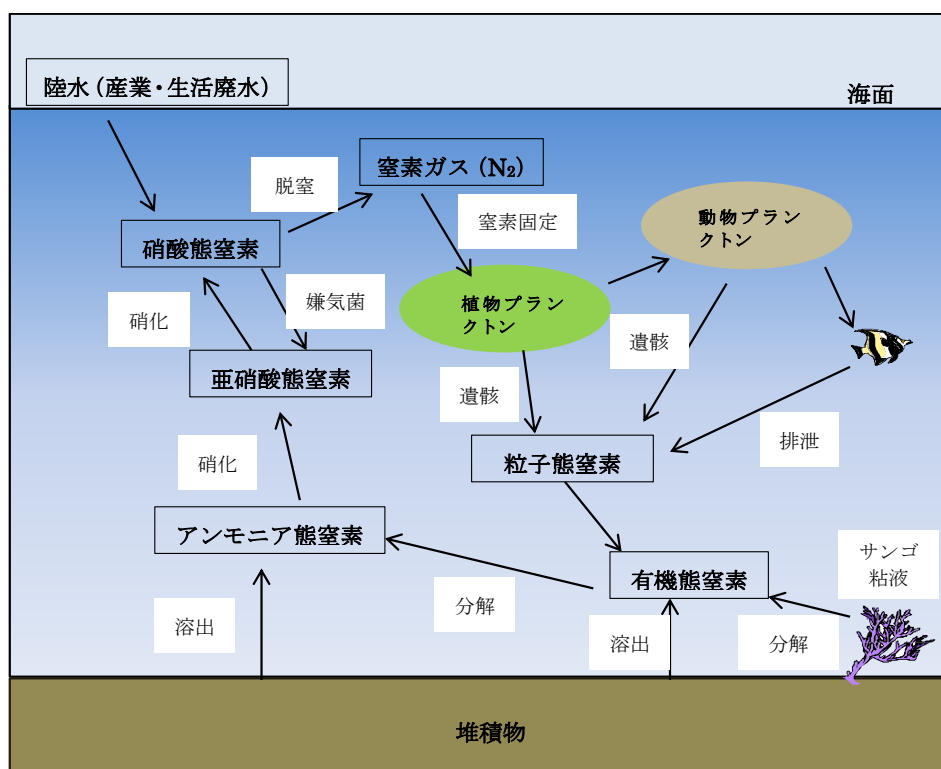


図 1.4.3.3 サンゴ礁における窒素循環の模式図

DIN は 2015 年 1 月 20 日表層採水で、北礁礁縁、仲間川河口で極めて高い値、新城島でやや高い値を示した。その主な構成はアンモニア態窒素及び硝酸態窒素で、産業活動の影響と考えられる。

TDN は仲間川河口で極めて高い値(2014 年 11 月 8 日表層)、北礁礁縁及び仲間川河口(2015 年 1 月 20 日表層)、黒島東礁池及び新城島(2014 年 11 月 8 日表層)で比較的高い値がみられたが、一定の傾向は示していない。

図 1.4.3.4 に粒子態窒素 (PON) の推定値 (2015 年 1 月石西礁湖 10 地点全窒素 T-N 測定値から各年度測定溶存態窒素値を差し引いた値) を示した。小浜港沖及び竹富島南で高い傾向がみられる。これが透明度に影響を及ぼすと思われる (図 1.4.3.5)。ハワイにおける研究では、PON の供給源はシアノバクテリア *Synechococcus* と従属栄養バクテリアで、これらの捕食者は海綿類とホヤ類である (Ribes et al. 2005)。石西礁湖でも夏季に懸濁物が多くみられることがあり、採水し、コールターメーターで測定したところ、1 μ m 付近に高いピークがあった。これらのことから石西礁湖でもシアノバクテリアが PON を増加させ、濁りの原因となっている可能性が考えられた。

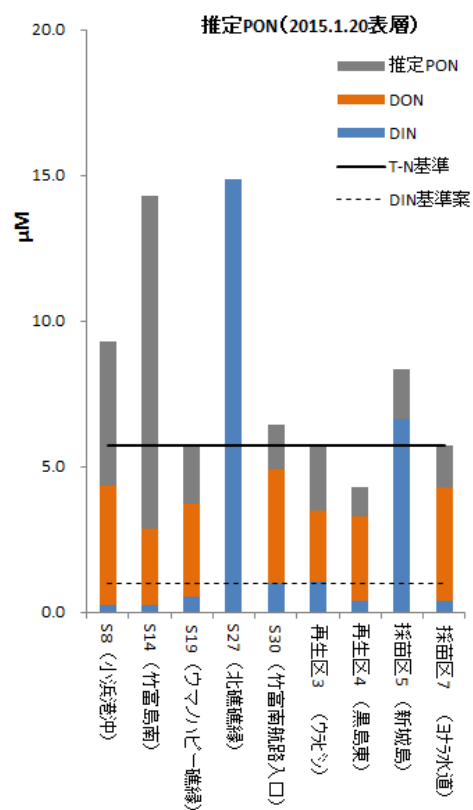
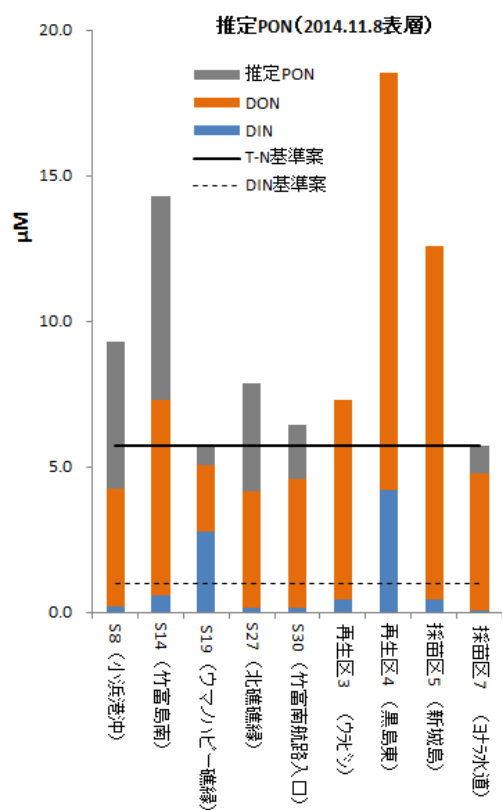
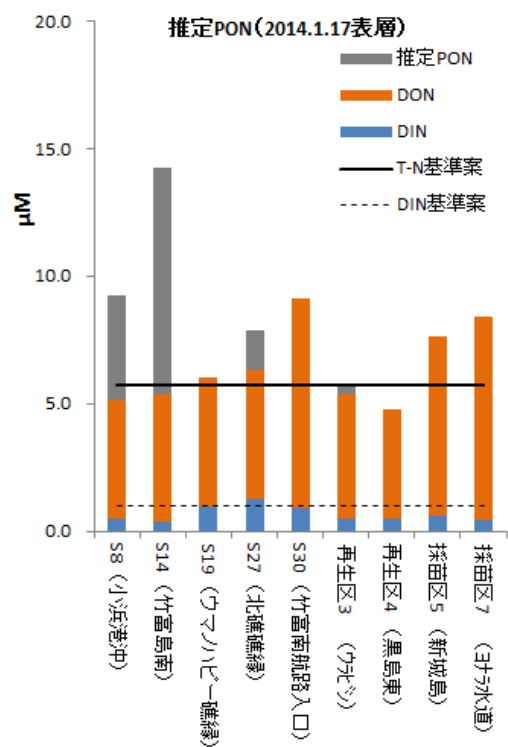
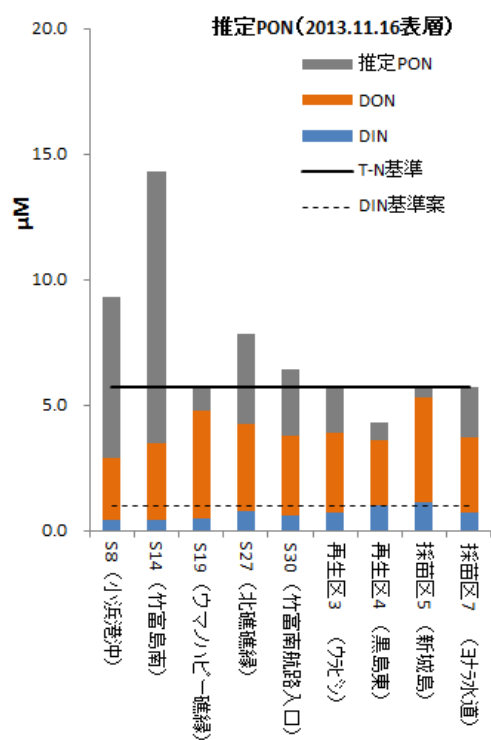


図 1.4.3.4 石西礁湖における粒子態窒素 (推定)

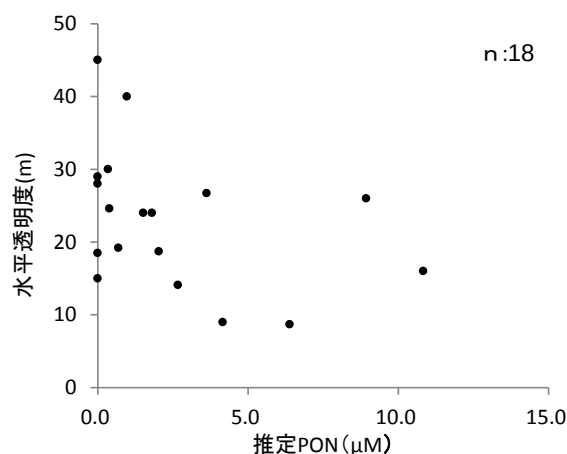


図 1. 4. 3. 5 粒子態窒素（推定）と水平透明度（2013 年 11 月、2014 年 1 月測定値）の
相関

粒子態窒素がサンゴに及ぼす影響については、透明度の低下による光合成の減少や堆積によるストレスの増大が考えられる。図 1. 4. 3. 6 及び図 1. 4. 3. 7 に調査地点における粒子態窒素（推定）と環境ストレスに対し鋭敏なミドリイシ属の被度及び 1 年生ミドリイシ属密度との関係を示した。いずれも負の相関がみられ、粒子態窒素の増加が、ミドリイシ属の生息に影響を及ぼしていることが示唆された。

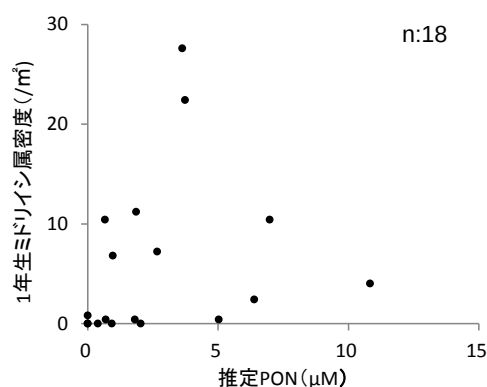
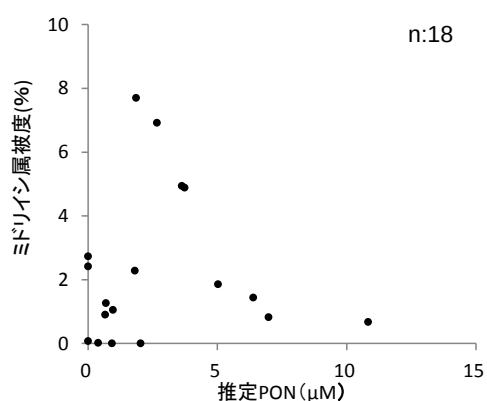


図 1. 4. 3. 6 粒子態窒素とミドリイシ属被度

図 1. 4. 3. 7 粒子態窒素と 1 年生ミドリイシ属密度

（推定 PON：2013 年 11 月、2014 年 11 月の表層測定、ミドリイシ属：2013 年、2014 年調査）

粒子態窒素と採水地点に近いモニタリングサイト 1000 調査地点の SPSS との関係を図 1. 4. 3. 8 に示す。2013 年度の結果から、堆積物中の微細生物の巻き上げが、海水中の粒子態窒素増加に影響を及ぼしているかもしれない。

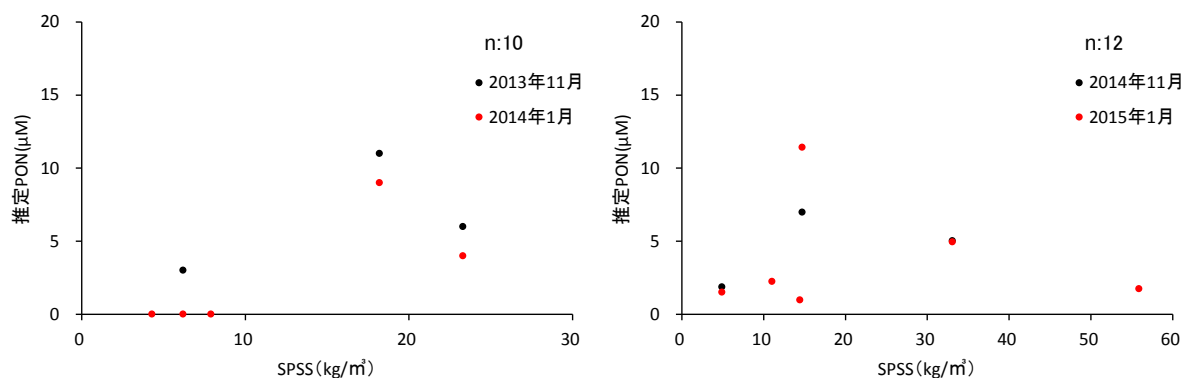


図 1.4.3.8 粒子態窒素と SPSS の関係（左：2013 年度、右 2014 年度）
（推定 PON：2013 年 11 月、2014 年 11 月の表層測定、SPSS：2013 年度、2014 年度測定）

2) 定点調査（環境省海洋観測ブイ測定結果）

海洋観測ブイは石西礁湖北部、竹富島と小浜島間に広がる閉鎖的海域の平均水深 7.9m の地点に設置されている（図 1.4.3.9）。2008 年 7 月 2 日の設置以降、水温・塩分、クロロフィル・濁度、流向・流速、波高について毎時観測が行われてきた。

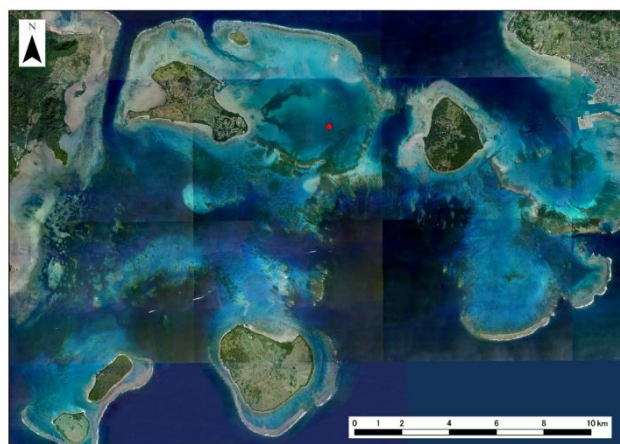


図 1.4.3.9 海洋観測ブイ設置位置

① クロロフィル

2015 年 4 月 1 日～2016 年 3 月 8 日の観測値（毎 20 分測定）では、石西礁湖におけるクロロフィル値は概ね $1\mu\text{g/L}$ 未満で推移していたが、クロロフィル値が $1\mu\text{g/L}$ を超えたときの流向の出現頻度をみると、南流時に出現する傾向がやや大きかった（図 1.4.3.10）。海洋観測ブイにおける流向は南北方向に卓越しており、外洋に開けた方向である南方向、または竹富島と小浜島間に向けた北方向で卓越しており、潮汐による竹富島～小浜島間を通過する流れが卓越している（環境省那覇自然環境事務所 2016）。そのため、礁湖北部の高いクロロフィル値を有する海水が上げ潮では、低い値を示す外海水により希釈されたと推定される。

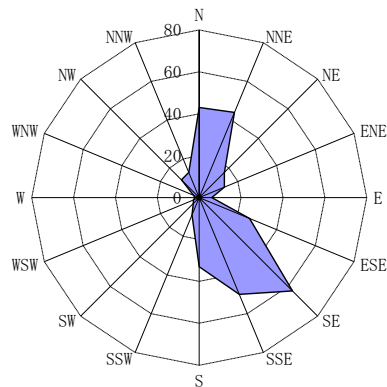


図 1.4.3.10 クロロフィル 1 μ g/L 以上の時の流向頻度分布

なお、2015 年の観測期間中の毎時観測値の出現頻度をみると、0.5 μ g/L が 85%を占めており、海洋観測ブイにおける平常の値は 0.5 μ g/L である。季節変動をみると、5 月と 9 月に明らかな上昇が認められる（図 1.4.3.11）。9 月の上昇は台風時における急激な上昇が平均値に反映したものであるが、5 月の上昇は降水について、植物プランクトン増殖の好適条件があったと考えられる。月降水量はやや多く（図 1.4.3.12）、日射量は 6 月が年最大であった（図 1.4.3.13）。クロロフィル濃度は 5 月には 1.4 μ g/L で最高値を記録し、1 月最低値 0.3 μ g/L の 4.7 倍に達した。

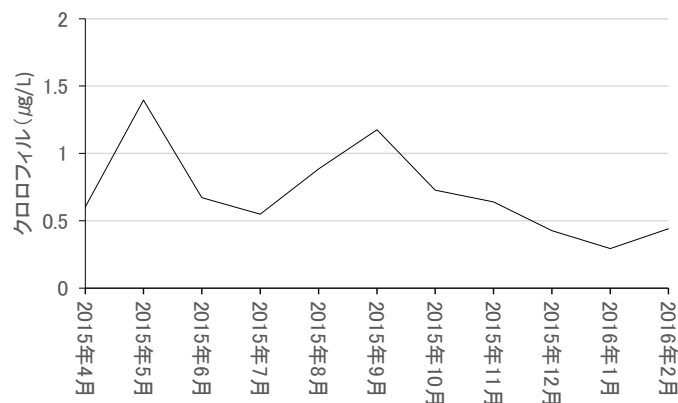


図 1.4.3.11 クロロフィル月平均値

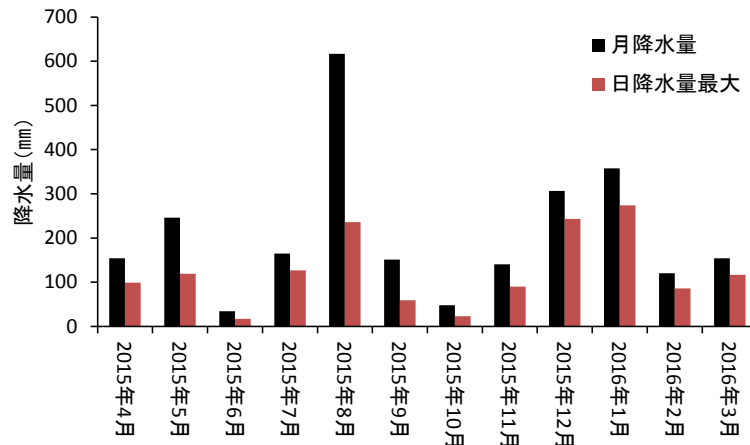


図 1.4.3.12 石垣島における 2015 年 4 月～2016 年 3 月の月降水量と日降水量最大 (気象庁資料)

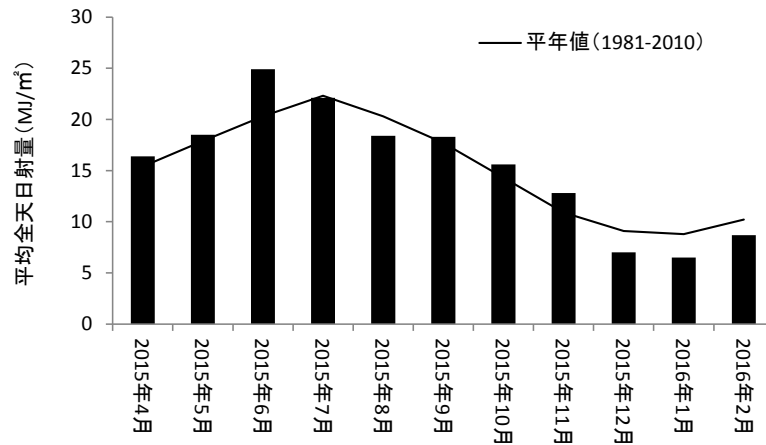


図 1.4.3.13 石垣島における月平均全天日射量 (気象庁資料)

② 濁度

2015 年度の毎時観測値の約 85%が濁度 1 以下であることから、海洋観測地点における通常の濁度は 1 以下であると考えられる。

濁度は 8 月、9 月に顕著に高く、両月とも約 1.5 であった。8 月、9 月以外は概ね 0.3 ～0.6 の範囲であった (図 1.4.3.14)。水温の高い時期ではあるが、7 月と比べて、大きな差があるため、台風時の大きな濁りが値に反映した可能性がある。

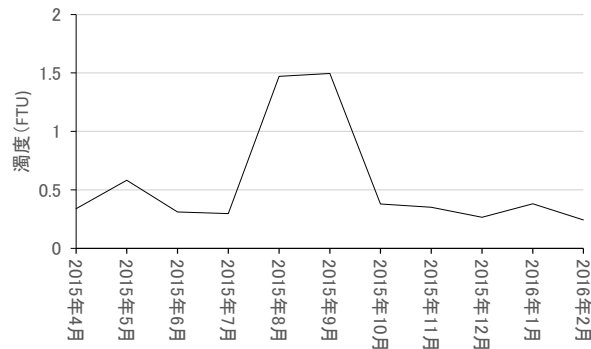


図 1. 4. 3. 14 濁度月平均値

(4) 考 察

図 1. 4. 3. 15 に石西礁湖全調査地点における全窒素の平均値経年変化を示す。2010 年から 2013 年にかけて低下傾向がみられる。また、海洋観測ブイにおける濁度、クロロフィルの 7 月（高水温期で台風のようなイベントが少ない）経年変化をみても、増加傾向はみられない（図 1. 4. 3. 16）。礁湖全体としては、水質対策が水質のさらなる富栄養化をとどめていると考えられる。

しかし、沖縄県衛生環境研究所による県下 104 海域における水質調査結果とサンゴ生息状況との解析結果から、サンゴ被度 50% 以上に必要な水質（年平均値）を全窒素 0.08mg/L 以下、全リン 0.01mg/L 以下、DIP（溶存無機態リン）0.006mg/L 以下、濁度 0.11 以下、水平透明度 14.0m 以上とした報告がある（金城 未発表資料）。全窒素 0.08mg/L を一つの基準案と考えれば、石西礁湖の栄養塩は未だサンゴ群集の良好な生息環境に達していないといえる（図 1. 4. 3. 15）。

なお、集水域にほとんど人為的影響のないサンゴ礁における水質として、1995 年～1996 年において、各年 5 月～12 月の期間に実施された、西表島網取湾での表層採水結果がある。当該結果において全窒素の測定値は 0.04mg/L～0.05mg/L であったので（油井ら 1997）、全窒素基準案は石西礁湖の基準として大きな乖離はないと考えられる。

海外での事例として、インド洋島嶼国であるモーリシャスでの測定例がある。モーリシャス国の海岸線はほぼすべてサンゴ礁に囲まれており、その幅は 5km を超えるような場所もみられるが、概ね 1km 以下で、浅いラグーンが広がり、海草も場やサンゴ群集の分布がみられる。近年、水質の悪化が顕著で、そのためサンゴ群集の衰退が起こっている。2012 年、JICA（2015）がラグーンの代表的地点で実施した水質調査及びスポット・チェック法によるサンゴ被度調査結果によれば、濁度、クロロフィル a、硝酸態窒素、リン酸態リンの濃度が高くなるとサンゴ被度が指数関数的に減少した（図 1. 4. 3. 17）。

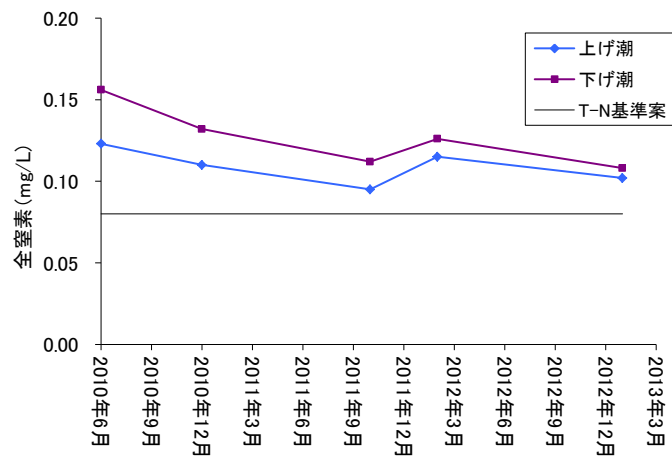


図 1.4.3.15 石西礁湖 10 地点における全窒素平均値

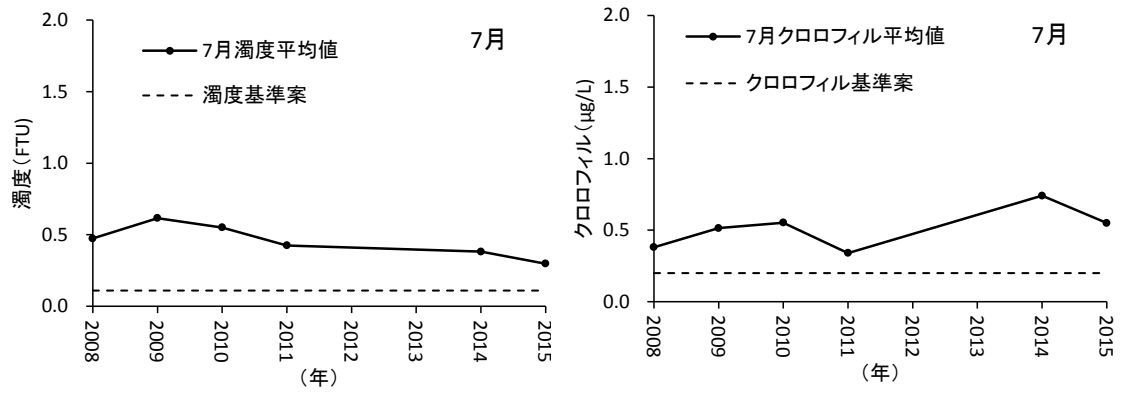
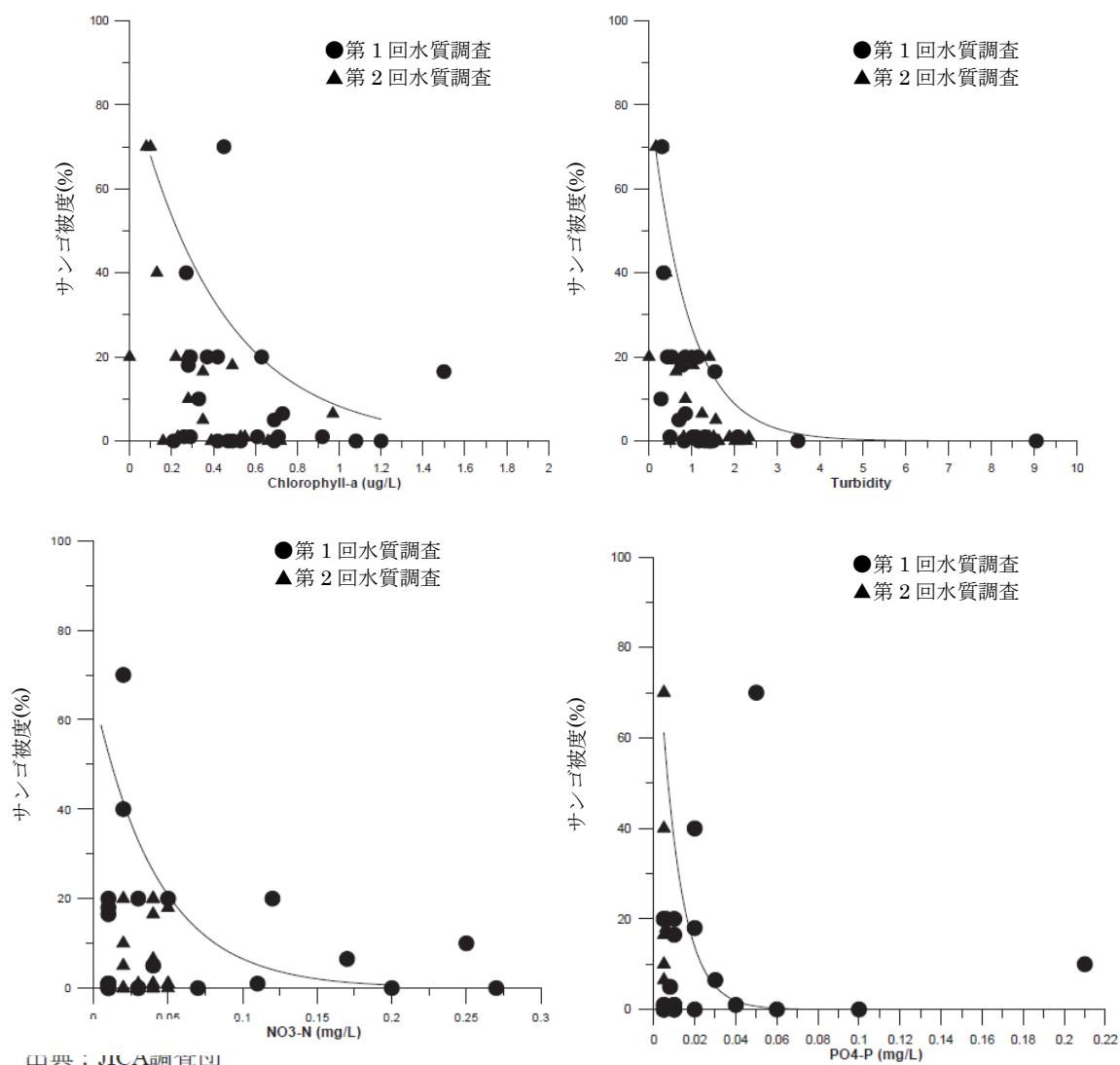


図 1.4.3.16 海洋観測ブイの濁度、クロロフィル経年変化 (7 月平均値)



出典：JICA調査図

図 1. 4. 3. 17 モーリシャスにおける栄養塩とサンゴ被度の関係（JICA 2015 を改変）
（左上：クロロフィル a、右上：濁度、左下：硝酸態窒素、右下：リン酸態リン）

これらの結果から、モーリシャス国ラグーンにおけるサンゴ被度と水質要因との関係が表 1. 4. 3. 1 のとおり示された。図 1. 4. 3. 2 に示した硝酸態窒素の値は全て < 0. 01mg/L であるので、表 1. 4. 3. 1 の硝酸態窒素基準であれば、サンゴ被度は > 50% であるが、石西礁湖では、溶存有機態窒素量が極めて大きいため、この基準だけでサンゴ被度との関係を論じることができない。また、GBR やカリブ海の研究により、溶存無機態窒素 (DIN) 1μM が富栄養化の閾値とされている (Vecsei 2003)。図 1. 4. 3. 4 (1. 4. 3. 5p) では概ね基準値以下であるが、石西礁湖では、T-N に占める DIN の割合は小さい。

表 1.4.3.1 サンゴ被度と水質要因との関係（モーリシャス、JICA2015）

サンゴ被度 (%)	クロロフィル a ($\mu\text{g/L}$)	濁度 (NTU)	硝酸態窒素 (mg/L)	リン酸態リン (mg/L)
>50	<0.2	<0.5	<0.012	<0.007
20-50	0.2-0.6	0.5-1.36	0.012-0.051	0.007-0.016
10-20	0.6-0.9	1.3-1.9	0.051-0.081	0.016-0.023
<10	>0.9	>1.9	>0.081	>0.023

GBR 礁湖では、クロロフィル a の年平均濃度 $0.5\mu\text{g/L}$ 以下が富栄養の目安として提案されている (Bell 1992)。GBR 海中公園局水質ガイドライン (Great Barrier Reef Marine Park Authority 2010) によれば、藻類繁殖やサンゴの衰退を防ぐクロロフィル年平均濃度は $0.4-0.5\mu\text{g/L}$ 以下で、透明度は $10-15\text{m}$ 以上である。これらの結果から、石西礁湖の水質現況をみると、全窒素 0.13mg/L 程度、濁度月平均値 1.5、クロロフィル $0.2\mu\text{g/L}$ を超える月があり、沖縄県基準案やモーリシャス報告の被度 50% 以上の基準には達していない。また、クロロフィル a については、全ての月が月平均値 $0.2\mu\text{g/L}$ を超えており、モーリシャスの基準に達していない。そのため、今後も引続き、水質汚染対策を強化するために、特に対策を必要とする重点海域における水質モニタリングを進める必要がある。

引用文献

- Bell, PRF (1992) Eutrophication and coral reefs-some examples in the Great Barrier Reef lagoon, Water Research, 26:553-568.
- Great Barrier Reef Marine Park Authority (2010) Water Quality Guideline for the Great Barrier Reef Marine Park
- JICA (2015) モーリシャス国海岸保全・再生に関する能力向上プロジェクト, ファイナルレポート (メインレポート) Vol.1
- 環境省那覇自然環境事務所 (2016) 平成 27 年度石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査等業務報告書
- 金城孝一 (未発表資料)
- Ribes M, Coma R, Atkinson M, Kinzie III RA (2005) Sponges and ascidians control removal of particulate organic nitrogen from coral reef water. Limnol Oceanogr 50(5):1480-1489.
- 田中泰章 (2012) 造礁サンゴの栄養塩利用と生態生理学的影響, 海の研究 (Oceanography in Japan) 21 (4) : 101-117.
- Vecsei A (2003) Nutrient control of the global occurrence of isolated carbonate banks. Int J Earth Sci 92:476-481.
- 油井正明・酒井一彦・横地洋之・内田紘臣・岩瀬文人・浅井康行・森 美枝・古谷勝則・黒瀬 毅・水嶋信文 (1997) 陸域の土地利用がサンゴ礁に与える影響, サンゴ礁生態系の維持機構の解明とその保全に関する研究. 平成 6~8 年度環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, 79-109.

[補足]

1. 洗剤使用量とサンゴの関係について

沖縄県内の洗剤使用量については、一世帯当たりの年間消費支出からみた沖縄県の洗剤消費量が全国の 2 倍であり、居住域から海までの距離が短いことから、合成洗剤の使用がサンゴ礁に及ぼす影響について検証が必要との報告がある¹。しかしながら、具体的なサンゴ礁への影響については調べられていない。

表 1 一世帯当たりの年間消費支出(抜粋)、

	消費支出(沖縄)	沖縄	全国
シャンプー・リンス	5466 円	0.8	0.4
化粧石鹸	3130 円	0.4	0.1
沖縄そば(麺類)	14724 円	2.0	1.9
豆腐	8319 円	1.1	0.8
豚肉	20310 円	2.7	2.2
泡盛(焼酎)	5732 円	0.8	0.4

総務庁統計局『家計消費支出調査年報』(平成 8 年)

表 2 洗剤の県別出荷量

	人口 1998 年 (万人)	出 荷 量 (1998 年)					
		家庭用 合成洗剤(t)	工業用合 成洗剤陰	陰イオン界 面活性剤	陽イオン界 面活性剤	非イオン 界面活性剤	その他の界 面活性剤
全国計	126486	1047070	221890	287875	158230	397544	75403
北海道	5700	60					
宮城	2355	7098	1320				
茨城	2996	12312	19169	21958	6289		
群馬	2025	84898	614	4523			
埼玉	6894	36358	23308			4274	
千葉	5887	128003	13634				
奈良	1447	1394					
大阪	8804	160449	39272	63320	4187	86500	12779
兵庫	5461	16425	6372	19238	7001	13975	7699
和歌山	1076		21344	42886			
滋賀	1323		34144			4961	4977

**沖縄県の場合は、「秘匿の対象となった都道府県」と表記されデータとして出ていない。

出典『平成 10 年度工業統計表』(筆者抜粋)

¹李・生見(2001) サンゴ礁に関する調査研究報告書(財)亜熱帯総合研究所。

環境省は平成 25 年に水生生物の保全に係る水質環境基準の項目に直鎖アルキルベンゼンスルホン酸（LAS）を追加した²。公共用水域調査で直鎖アルキルベンゼンスルホン酸（LAS）の分析が H25 年から H26 年で実施されるようになった。ただし、LAS の分析実績があるのは内地の主に河川・湖沼に限られ、沖縄県内あるいは海域での調査は実施されていない。

表 1 新たに追加する項目

項目	水域	類型	水生生物の生息状況の適応性	基準値
直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩	河川及び湖沼	生物 A	イワナ、サケマス等比較的低温域を好む水生生物及びこれらの餌生物が生息する水域	0.03mg/L 以下
		生物特 A	生物 A の水域のうち、生物 A の欄に掲げる水生生物の産卵場（繁殖場）又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	0.02mg/L 以下
		生物 B	コイ、フナ等比較的高温域を好む水生生物及びこれらの餌生物が生息する水域	0.05mg/L 以下
		生物特 B	生物 A 又は生物 B の水域のうち、生物 B の欄に掲げる水生生物の産卵場（繁殖場）又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	0.04mg/L 以下
	海域	生物 A	水生生物の生息する水域	0.01mg/L 以下
		生物特 A	生物 A の水域のうち、水生生物の産卵場（繁殖場）又は幼稚仔の生育場として特に保全が必要な水域	0.006mg/L 以下

²水生生物の保全に係る水質環境基準の項目追加等に係る環境省告示について（平成 25 年 3 月 27 日 環境省報道発表資料）。

直鎖アルキルベンゼンスルホン酸（LAS）のサンゴに対する毒性については、トゲサンゴとハナヤサイサンゴについて、それぞれ 840 群体を用いて、24 時間各濃度（0、0.1、0.25、0.5、0.75、1、5mg/L）の LAS に暴露した後、203 日モニタリングした研究があり、暴露 28 日後の生残率から LC50 をトゲサンゴでは 1.00mg/L、ハナヤサイサンゴでは 2.21mg/L としている³。

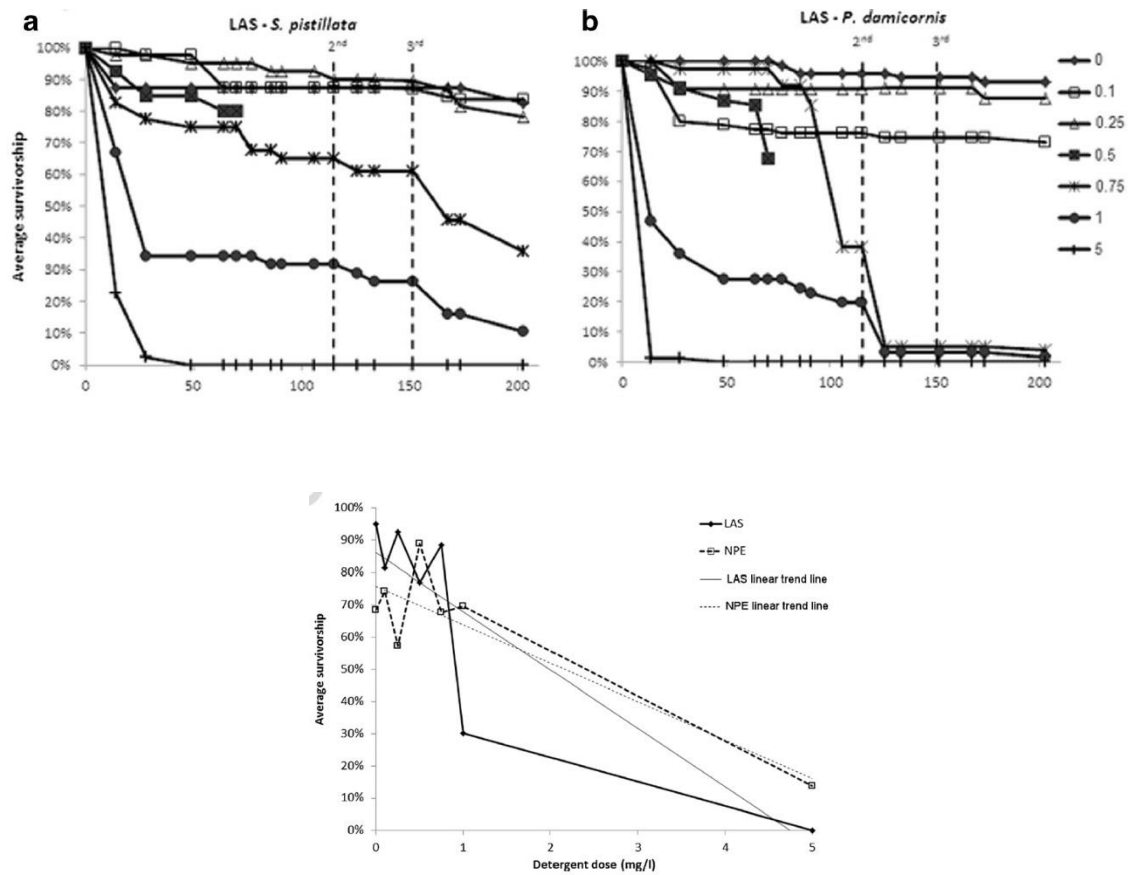


Table 1 Calculated LC₅₀ values for each coral species under LAS and NPE administrations

Treatment	r^2	Equation	LC ₅₀
LAS- <i>Stylophora</i>	0.777	$y = -0.1545x + 0.7549$	1.00
LAS- <i>Pocillopora</i>	0.762	$y = -0.1864x + 0.9119$	2.21
Total LAS	0.763	$y = -0.1814x + 0.8607$	1.99
NPE- <i>Stylophora</i>	0.699	$y = -0.0773x + 0.7342$	3.03
NPE- <i>Pocillopora</i>	0.922	$y = -0.1571x + 0.8554$	2.26
Total NPE	0.793	$y = -0.1195x + 0.7586$	2.16

³ Shafir et al, (2014) Toxicology of household detergents to reef corals, Water Air Soil Pollut., 225:1890

2. 離島における水道使用量

石西礁湖の小島嶼には河川がないため、海底送水管設置以前は、ほぼ天水に頼った生活をしてきた。井戸もあったが、低平な隆起サンゴ礁島では地質の透水性が高いことから、大量に汲み上げると、満潮時には海水が地質にしみこみ、鹹水となるため、大きな供給源ではなかった。1972 年、日本復帰後、各島に送水管が敷設され、1974 年竹富島を皮切りに上水道が使用されるようになった。その供給量を下図に示す⁴。2007 年には、約 700,000 t/年になり、開始時の約 16 倍に増加した。1974 年の竹富島のみへの供給量 6,200 t/年は、人口 336 人（1970 年）で割ると、50L/人日である。上水道供給以前は、50L/人日以下であったと思われる。2000 年におけるわが国の家庭における平均水道使用量は約 300L/人日である⁵。その内訳（2006 年）は、トイレ 28%、風呂 24%、炊事 23%、洗濯 16%、洗面等 9%である⁶。これをあてはめると 50L/人日は、ほぼ炊事に使われたと推定される。今日のように、簡易浄化槽からの廃水、風呂や台所からの洗剤等の廃水は極めて微量であったと思われるので、サンゴ礁への窒素、リンのような栄養塩や界面活性剤の負荷は極めて限定的なものであったと考えられる。そのため、今日とは異なり、サンゴ礁の海水は澄み切っていたのであろう。今後、栄養塩の動態を定量的に詳細に把握することが必要である。

石西礁湖に影響を及ぼすと考えられる石垣市南部（石垣市街地）の水道使用量も併せて示した。また、参考までに慶良間列島の水道供給量も示した。

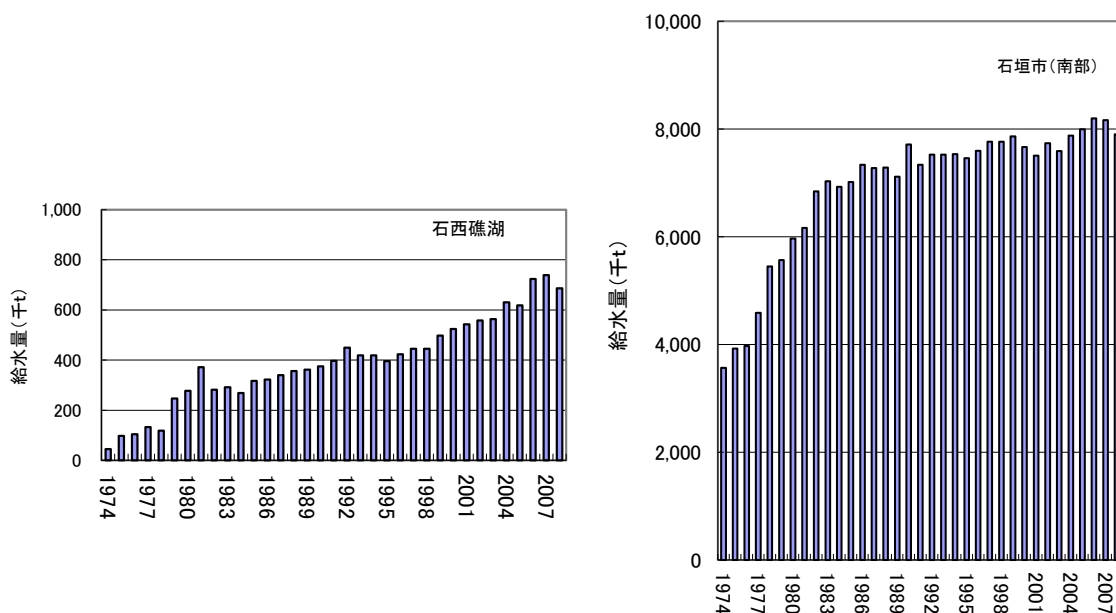


図 a 石西礁湖における年水道供給量

（左：西表島東部、竹富島、黒島、新城島、小浜島、右：石垣市街地）

⁴ 沖縄県（1974～2009）各年度「沖縄県の水道」

⁵ 厚生労働省（2000）上水道統計

⁶ 東京都水道局（2006）水道資料

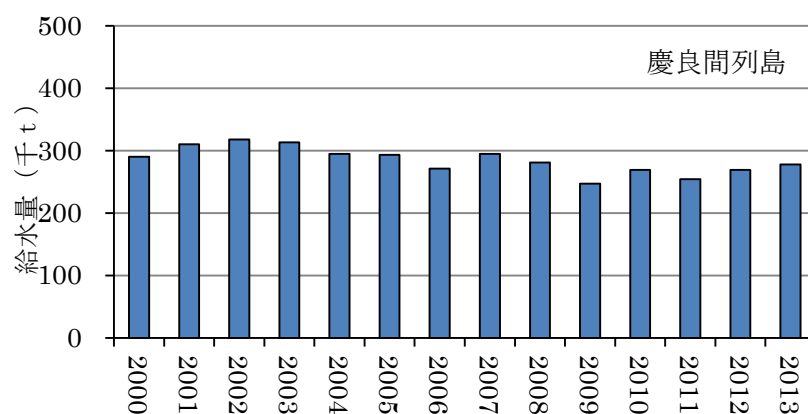


図 b 慶良間列島における年水道供給量
(沖縄県統計資料)

渡嘉敷村及び座間味村を合わせた供給量は 2000 年以降、大きな変動はなく、およそ 300 千 t で推移している。石西礁湖の約半分である。人口は約 1800 人（2007 年、沖縄県統計資料）で、石西礁湖の約 2200 人（2007 年竹富島、黒島、小浜島、新城島、西表島東部、竹富町統計資料）と比較すると約 80%であるが、水道供給量は半分である。大型の宿泊施設がないことと、節水が行われているためと思われる。