

F-5 サンゴ礁における生物多様性構造の解明とその保全に関する研究

(3) サンゴ礁生物多様性モニタリング手法の開発に関する研究

① 衛星画像によるサンゴ礁の変遷過程の解明に関する研究

研究代表者 中央水産研究所 変動機構研究室 川崎 清

中央水産研究所

海洋生産部 変動機構研究室 廣江 豊・小松幸生

平成9～11年度合計予算額 7,773 千円
(平成11年度予算額 2,414 千円)

[要旨] 人工衛星を用いたサンゴ礁の長期モニタリング手法を開発した。衛星画像を用いる上で
の問題点である位置あわせ・雲の抽出・潮位等の外部変動の削除を行う事ができた。石垣島東方
の石西礁湖の一部の海域において長期変動を抽出をおこなった。その結果 1998 年に発生したサ
ンゴの白化に対するシグナルが抽出され、その空間分布する事ができた。

[キーワード] 衛星画像、サンゴ礁、長期変動、可視光、モニタリング

1. 序

海洋生物の生息環境の一つとして重要なサンゴ群落は、浅海域に位置する事から開発の影響を
受けやすい。特に、1975 年以降の急激な開発に伴う、物理的な破壊、道路の造成や農地の改善
に伴い流出した赤土や、人間排水による富栄養化等に伴い、サンゴの種の変化また生育阻害さら
には死滅に至るといふ状況が現在まで続いている。これらの状況を速やかに抽出し、適切な対策
を講ずる事が求められている。また、地球温暖化による環境変動がサンゴ礁域の多様性にどのよ
うな影響を与えるかを長期にわたりモニタリングすることが求められている。

2. 研究目的

サンゴ礁域に起こっている変化を、広範囲にわたり均一にモニタリングする事は人力・費用の
点で容易ではない。そこで本研究では、人工衛星の画像を用いて、画像からサンゴ礁域の10年
スケールの長期の変化を抽出する事を目指す。海水は赤外域より長い電磁波はほとんど通さない
ため、サンゴ礁域のモニタリングに利用可能なものは可視域である。可視域にしても透過率が良
いわけではなく、吸収・散乱されてしまう。サンゴ礁の上にはその海水が存在しており、さらに
悪いことには撮影時期により潮位が変化している。また、サンゴ礁の存在している水深は場所
により大きく異なっている。同じ地点を空中から撮影するにしても、観測時期が異なれば水深が変
わっており、同じ色のものが異なる色で示されてしまう。そのため、何らか補正を行うことによ
り元の色を再現し、その場所の生物群集の特性を色の変化で特定することを目指した。

研究サイトとして、現場観測を行う上で西海区水産研究所の石垣支所の協力を得る事が有功と
考え、南西諸島海域を選んだ。衛星データとしては古くから LANDSAT・MSS 画像があるが、空

間分解能が悪いこと・青色のバンドがないことから、次に古くから(1984年)連続して運用されている空間分解能 30m の LANDSAT・TM 画像を用い解析を行った。なお、SPOT 衛星の利用も考慮したが空間分解能は良いものの青域のバンドが存在しないため、利用を見送った。

3. サンゴ礁の反射率の変動の推定

人工衛星の画像から得られる情報には、サンゴからの情報以外に、太陽高度・エアロゾルなどの大気の状態・サンゴの上にある海水の状態等が考えられる。

すなわち、画像の各ピクセルの値は

$$E_{ij}(\lambda) = F_{ij}(\lambda) \cdot t_{ij}(\lambda) \cdot a_{ij}(\lambda) \cdot R_{ij}(\lambda) \quad (1)$$

とあらわす事ができる。ここで、 λ は波長

$E_{ij}(\lambda)$: 衛星観測値 (ij は位置を示す)	$F_{ij}(\lambda)$: 大気圏外太陽入射輝度
$t_{ij}(\lambda)$: 大気の吸収散乱係数	$a_{ij}(\lambda)$: 海水内の消散率
$R_{ij}(\lambda)$: サンゴの反射率	

である。海水からの反射成分も存在するが、赤域のバンドで水中光は速やかに減衰することを考慮し、浅海部のみしか解析しないためその影響は無視できる。

まず、 $F_{ij}(\lambda)$ については観測時期から推定可能である。 $t_{ij}(\lambda)$ については大気そのものの吸収散乱及びエアロゾルの吸収散乱によるものであるが、今回対象にしているサンゴ礁の領域がそれほど大きくないため、サンゴ礁域全域で一様とみなす事ができる。ただし、観測された時期により大きく変化している事が考えられる。以上の事により $F_{ij}(\lambda)$ 、 $t_{ij}(\lambda)$ については画像毎に一定とみなすため、以降これらを併せ $S(\lambda)$ と記する。

海水内の消散率である $a_{ij}(\lambda)$ については、

$$a_{ij}(\lambda) = \exp(-2 K_{ij}(\lambda) (h_{ij} + \eta))$$

ただし、 h_{ij} は平均水深、 η は潮位、 $K_{ij}(\lambda)$ は海水の消散係数。海水の消散係数は一般的に深度により変わるが、対象とする浅海域ではその変化による消散量は小さいため、水深による変化は無視する。この海水による消散量は、河川水等の濁水等により空間的に大きく異なっている事が考えられる。

図1に南西諸島近傍の海域での水中分光特性を示す。縦軸は空中照度で規格化した分光照度で、横軸は波長で、10m 深間隔で測定された値である。各線の比が消散係数となる訳であるが、410nm ~ 500nm にかけては波長による消散の割合は大きくないが、500nm より長い波長では波長による消散が大きくなり波長により異なっていることを示している。すなわちバンド1・バンド2での消散はそれほど大きくなく、同程度であるが、バンド3では大きく消散されており赤い気の情報越来越少なくなっていることがわかる。すなわち、深くなるにつれて赤みを失った画像となる。

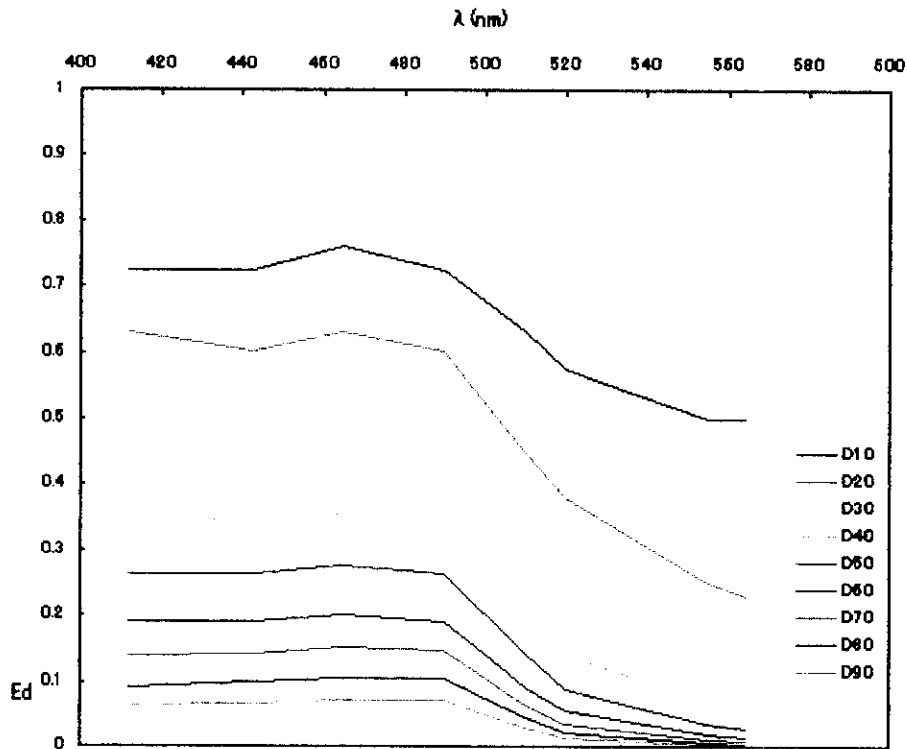


図1. 南西諸島近傍の海域での水中分光特性。縦軸は空中照度で規格化した水中分光照度、横軸は波長。上から順に10 m深、20 m深、以降、90 m深の値を示す。

(1)式を変形し、時間変化を考慮すると

$$\ln(E_{ij}(\lambda, t)) = \ln(R_{ij}(\lambda, t)) + \ln(S(\lambda, t)) - 2 K_{ij}(\lambda, t) (h_{ij} + \eta(t)) \quad (2)$$

となる。この3項を分離し、サンゴ礁からの反射を推定することになる。

まず、河川がある海域から離れた水質の変化が少ないと考えられる海域を選び出すと、 $K_{ij}(\lambda, t)$ はピクセルに依らないと仮定できる。そこで、(2)式を空間に対して平均化操作をおこなうと

$$\overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} = \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))} + \ln(S(\lambda, t)) - 2 K_0(\lambda, t) (\overline{h_{ij}} + \eta(t)) \quad (3)$$

ただし、 $\overline{\quad}$ は空間平均を意味する。(2)式から(3)式を引くと

$$\ln(E_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} = (\ln(R_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))}) - 2 K_0(\lambda, t) (h_{ij} - \overline{h_{ij}}) \quad (4)$$

この操作により、潮位変化及び大気圏外太陽入射輝度や大気の吸収散乱については考慮する必要がなくなった。

消散係数が大きく異なっているのは主に降雨等によるものと仮定すると、衛星画像に現れるのは、空間的には河口域に限定され、消散係数の時変化を見るとスパイク状に現れるはずである。サンゴ礁域は海水中には植物色素量が少ないことが想定されるので、ベースラインの消散係数は海水そのものの消散係数としても誤差はそれほど大きくないと想定される。そこで(4)式を時間的に平均したものを(4)式から差し引くと、

$$\begin{aligned} & \ln(E_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} - \langle \ln(E_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} \rangle \\ & = (\ln(R_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))}) - \langle (\ln(R_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))}) \rangle \\ & \quad - 2 (K_0(\lambda, t) - \langle K_0(\lambda, t) \rangle) (h_{ij} - \overline{h_{ij}}) \end{aligned}$$

ただし、 $\langle \rangle$ は同一点の時間平均値である。もしくは、

$$\begin{aligned} & V_{ij}(\lambda, t) \\ & = (\ln(R_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))}) - \langle (\ln(R_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(R_{ij}(\lambda, t))}) \rangle \\ & = \ln(E_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} - \langle \ln(E_{ij}(\lambda, t)) - \overline{\ln(E_{ij}(\lambda, t))} \rangle \\ & \quad + 2 (K_0(\lambda, t) - \langle K_0(\lambda, t) \rangle) (h_{ij} - \overline{h_{ij}}) \end{aligned}$$

$V_{ij}(\lambda, t)$ には対応ピクセルのサンゴ礁域からの反射率の変動成分及び海水の汚れ等による消散係数の変化成分が含まれている。 $V_{ij}(\lambda, t)$ について経験的直交関数をかけることにより、時間的に同相的な変動を抽出すれば、スパイク状に現れる濁水による水質変化とサンゴ礁そのものの変化を抽出することが出来る。

4. 画像解析

空間分解能 30m の LANDSAT 衛星 TM センサの南西諸島域の画像 33 シーンを入手し解析を行った(表 1)。用いたバンドはバンド 1 (0.45 μ m ~ 0.52 μ m、青域)・バンド 2 (0.52 μ m ~ 0.60 μ m、緑域)・バンド 3 (0.63 μ m ~ 0.69 μ m、赤域)、バンド 5 (1.55 μ m ~ 1.75 μ m、中間赤外域)である。画像サイズは 2551 ピクセル× 1991 ラインである。バンド 1 ~ 3 は可視域であり水中の情報が含まれているが、バンド 4 以降は赤外域になり水中の情報は含まれない。図 2 に最も雲の少なかった 1994 年 5 月 16 日のトルーカラー (赤にバンド 3、緑にバンド 2、青にバンド 1 を割り当てた画像)を示す。画像処理の流れは、画像間の位置合わせ・雲/欠測データ/陸域等除去・太陽照度/潮位変動による輝度変化の軽減・水深の影響の除去・経験的直交関数による時系列の抽出の順に行った。

4. 1 位置合わせ

同じ衛星のパス・ロウが同じでも、観測時期が異なれば、画像の中心位置の緯度・経度は同じではない。今回は同一センサを対象に解析を行ったが、解像度の異なるセンサを対象にする場合は画像の利サンプリングを行う必要もある。画像間で写している範囲が若干異なることから 2 つの手法で位置合わせを行った。

①目視による GCP マッチング

シーンから地形的に特徴的な地点 7 点を選び、各画像から位置を読み取った。最も雲の少な

観測日	目視		相互相関		1		2		3		4		
940516	0	0	0	0									
840707	-209	1	-209	-1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-3	
840925	203	-41	202	-41	0	0	0	0	-1	0	-2	0	
841112	-393	-15	-393	-15	0	0	0	0	0	0	0	0	
841214	-386	-30	-386	-30	0	0	0	0	0	0	0	0	
850507	-331	-14	-331	-16							0	-2	
850710	-93	-10	-93	-11	0	-1	0	0	0	-1	0	0	
860307	-128	-41	-127	-41	0	-1	1	0	1	0	1	0	
870121	-393	-1	-394	-1	0	2	-1	1	-1	1	-1	-2	
870206	-409	-12	-412	-11					-2	1	-3	1	
890705	26	-28	27	-28	1	0	1	0	1	0	1	1	
891025	-154	1	-154	1	0	-1	0	0	1	0	0	0	
900521	-33	-14	-32	-12	1	2	1	2			0	2	
900724	-69	-47	-72	-50	-3	-3	-3	-4			-4	-1	
910116	-72	-38	-72	-37	1	1			0	1	-1	0	
910508	-47	-79	-47	-79	1	1	1	0	0	0	0	0	
910711	-29	-57	-28	-58	1	0	1	0	1	0	0	-2	
911202	129	-55	130	-56			2	-1	1	-1	0	0	
920713	80	-60	80	-60	0	0			1	0	0	0	
920814	41	-24	41	-24	0	0	1	0	0	0	0	-1	
930630	-204	8	-204	7	0	-1	0	-1	1	-1	0	0	
930817	-217	2	-216	1			1	-1	1	-1	0	-1	
940905	-53	-55	-53	-56	-1	-1			0	-1	0	0	
950503	-106	-20	-105	-21	0	-1	1	0	2	-1	3	-1	
950908	73	-24	74	-25	0	-1	0	0	1	-1	1	0	
960825	-539	-16	-539	-16	1	0	1	1	0	0	0	-1	
961215	-480	-19	-481	-20					0	0	-2	-1	
970727	-370	-31	-371	-32	0	0					-1	-2	
980628	-254	-10	-253	-10	1	0	1	0	1	0	0	-1	
980730	-272	-38	-272	-36			0	2	0	2	-1	2	
980815	-300	-30	-300	-30			0	0	0	0	0	0	
981018	-343	-57	-343	-59	0	-1			0	-1	0	-4	
990207	-74	-31	-74	-31	0	1	1	0	1	0	0	0	
					average	0.1	-0.2	0.4	-0.1	0.3	-0.2	-0.3	-0.5

表1. LANDSAT・TM画像の撮影日，目視によるGCPマッチングによる1994年5月16日の画像空のずれ及び，相互相関法による位置あわせにより検出したずれ。右の4列はテンプレート毎の画像のずれ

った 1994 年 5 月 16 日の画像を基準に東西方向に最大 741 ピクセル南北方向に最大 86 ラインずれていた(表 1)。この手法では多少雲があっても読み取れるという利点がある。また、画像 1 枚 1 枚処理するので、地形の変化例えば石垣港の埋め立てによる GCP 点の変更や画像の劣化(衛星初期の画像については磁気媒体劣化によると考えられるライン落ちが散見される)を確認できる。

②相互相関法による位置合わせ

目視による GCP マッチングは、潮汐による海岸線の変化など地形によっては誤差を生じやすい。そこで、適当な大きさのテンプレートを用い、そのテンプレート内の地形と相関が良い地形を探す手法でさらに精密に位置合わせを行った。具体的な手法としては 1994 年 5 月 16 日のバンド 1 画像から切り出した 200 ピクセル× 200 ピクセルの画像と、目視による GCP マッチングで得られた対応位置が上下左右 20 ピクセルまでずれていると仮定して他のバンド 1 画像を切り出し、相互相関を計算しその極大値を持つ位置をもって対応位置とした。すなわち、ピクセル (i,j) の値を $IMG(i,j)$ 、テンプレートの値を $TMP(i,j)$ としたとき

$$E(m, n) = \sum_{i,j} (IMG(i+m, j+n) - TMP(i,j))^2$$



図 2 1994 年 5 月 16 日のトゥルーカラー (赤にバンド 3、緑にバンド 2、青にバンド 1 を割り当てた画像)

が極大となる (m,n) を求めた。用いたテンプレートの場所は (1) 野底石崎・玉取崎を含む領域、(2) 川平石崎付近を含む領域、(3) 白城島を含む領域、(4) 竹富島を含む領域である。目視による GCP マッチングとの差はほとんどの場合 ±1 ピクセルで最大 4 ピクセルであった (表 1)。

海域が西表島～石垣島近傍海域と広いため衛星姿勢等により画像がゆがんでいる可能性がある。その場合は同じピクセルが違う位置を表すことになる。しかし、4 領域の位置の差の最大は 0.5 ピクセルと 1 ピクセル内に収まっており、さらなる位置あわせをするための幾何変換はおこなわなかった。また、SPOT 衛星等、画像により同じ地点を見る角度が異なる場合、その地点の高度の変化により画像の対応点が異なり補正する必要があるが LANDSAT 衛星の場合は問題がない。同様にさらに高解像度の CARTERRA 衛星等を用いるときにも高度補正による画像の水平マッピングが必要になってくるであろう。

4. 2 雲/欠測データ除去

雲が存在すると時系列を作成する上で不都合が生じるため、雲域の検出手法を検討した。図 3 にバンド 1 の輝度のヒストグラムを示すが、雲の多い 1991/12/2 の画像以外は DN (ピクセルの値、デジタルナンバー) 48 ~ 144 にほとんどのものが入っている。1991/12/2 のヒストグラムに特徴的な点は DN112 の極大を迎えた後もそれほど下がらず DN240 で再び増大している。DN144 より大きく DN240 より小さいピクセルは、1 画素内すべてが雲で覆われているわけではなく、雲が一部かかっている状態と考えられる。空中での照度は大気の状態や太陽高度により変化するため余裕をみて、DN160 以上を雲とみなし、以後の解析では使わない。

データ取得から 15 年過ぎたデータも存在し画像の欠測がある画像があり、それらを以後の解析では使わないことにした。

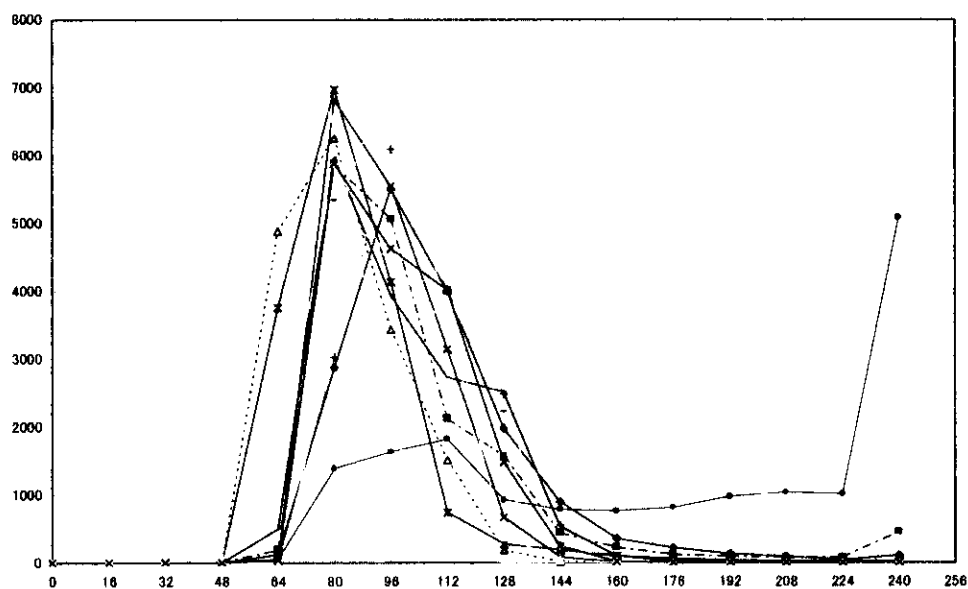


図 3. バンド 1 の DN (デジタルナンバー) のヒストグラム。1984/7/7、1984/9/25、1984/11/12、1987/2/6、1991/1/16、1991/12/2、1993/6/30、1994/9/5、1995/5/3、1996/8/25、1996/12/15、1997/7/27、1998/6/28 について図示している。

海底の反射率の変化を見たいので、陸域や海底の見えない海域を検出し、以後の解析に用いないようにする必要がある。陸域の抽出を行うために海中からはほとんどシグナルの帰ってこない中間赤外域のバンド5を用い、陸域と海域を分離するためのマスクファイルを作成した。単純に2値化するだけでは貯水池等が海域と認識されたり、海面からの波による太陽光の反射により海域が一部陸と認識されるため、それらを修正した。

海底からの情報が得られるかは1994年5月16日の画像のバンド1・2を用いて、海底/陸域が認められる領域と海底からの情報が得られない海域を分離した。このために、海底が反射率が非常に低いものにより覆われている場合、浅くても海底として認識されていない可能性がある。しかし、海底の情報が得られないのであるから、以降の解析に用いることはできず、等水深をもってマスクファイルを作成するよりは合理的であると判断した。

陸域のマスクファイルと海底からの情報が得られない海域のマスクファイルから、海底の見える海域を示すマスクファイルを作成した。図4に1994年5月16日の画像をマスクしたトゥルーカラー画像を示す。

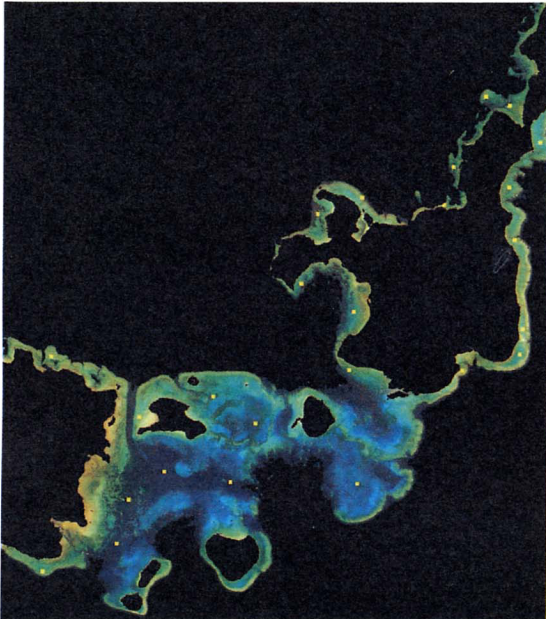


図4. 1994年5月16日の画像をマスクしたトゥルーカラー画像。黄色い点は経験的直交関数により解析を行った点。

4.3 大気・潮位変化の除去

太陽照度・大気の状態・潮位が異なると画像の輝度値もそれに応じて変化する。太陽照度・大気の状態の変化は陸地・海洋の輝度値に、潮汐等による水深の変化は海洋の輝度値に変化を及ぼす。そこで3章で述べた $V_{ij}(\lambda, t)$ を計算することによりその影響を軽減する事ができる。ただし、消散係数は時期・海域によって異なっているのでそれによる解析誤差は生じる。消散係数の変化が大きいと考えられる河口域等については、特に注意をもって見る必要がある。

4.4 経験的直交関数

これらの処理を行った画像から図4に示すように計25点の観測ポストを設けて、経験的直交関数で解析をおこなった。この観測ポストは「平成10年度石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリング調査」の調査地点を参考にして、解析に用いた33画像数より少なく決めた。経験的直交関数

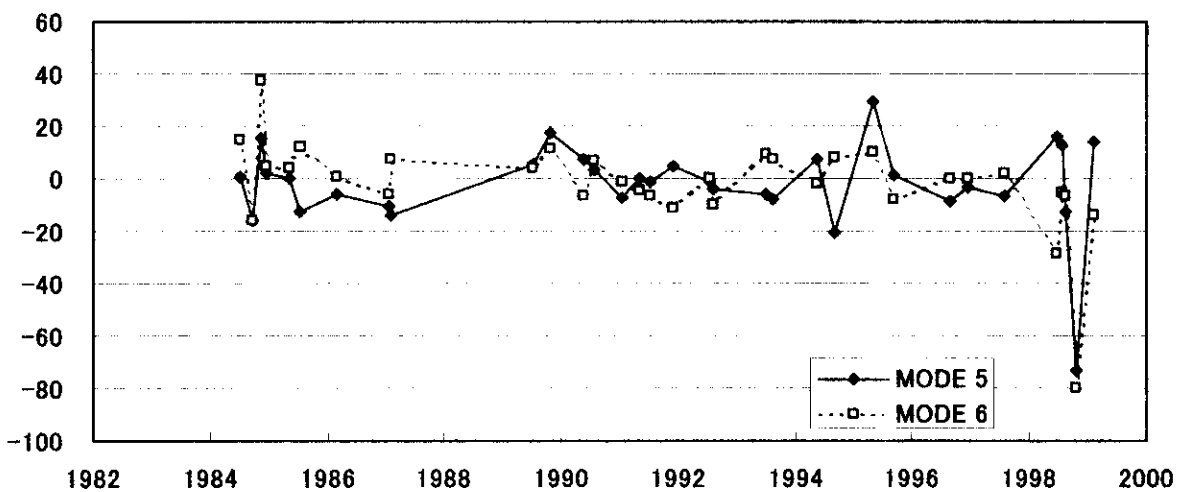
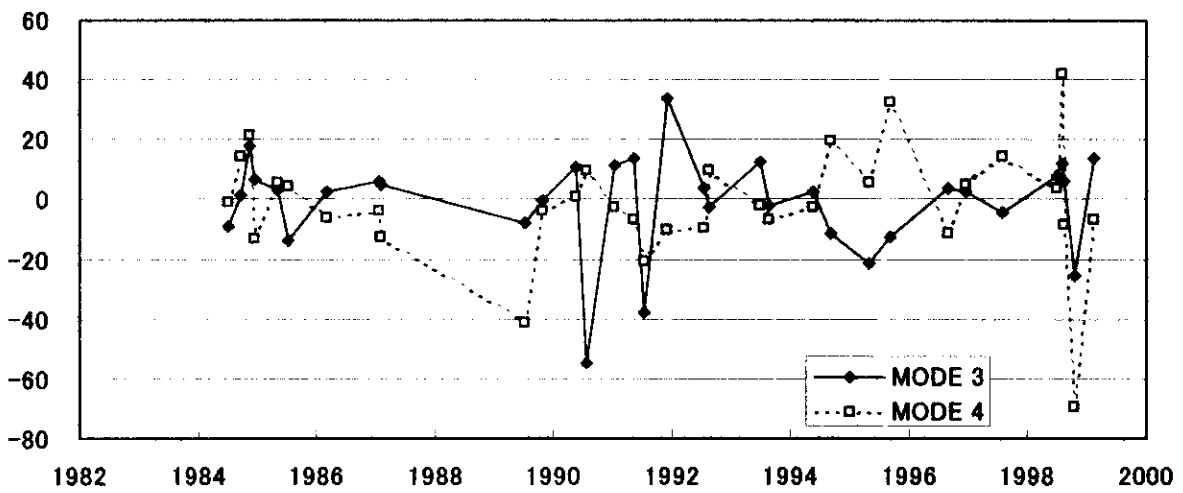
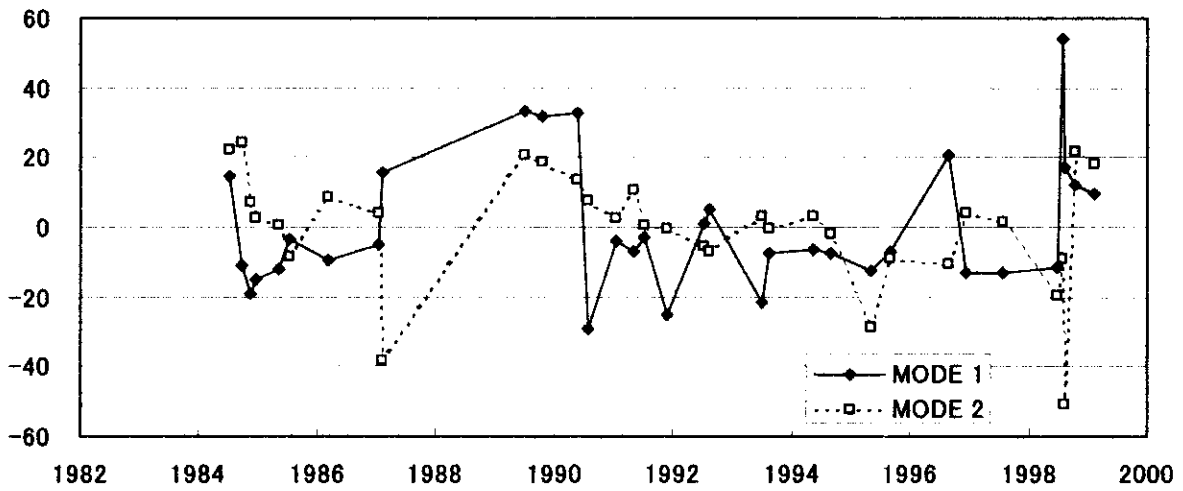
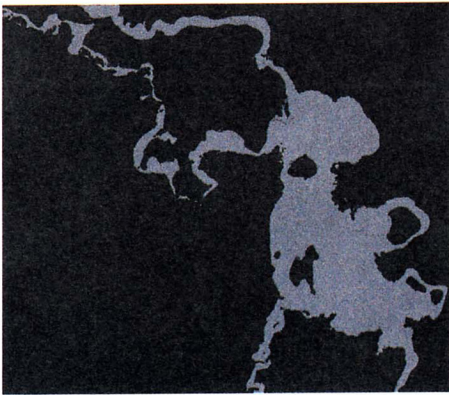
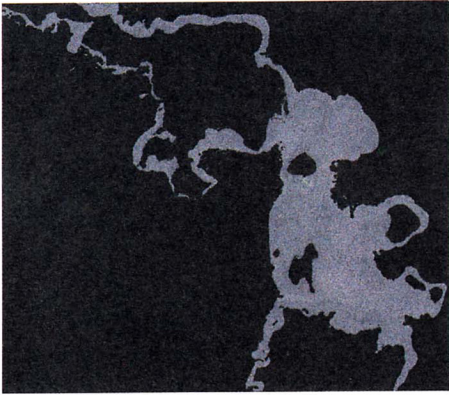


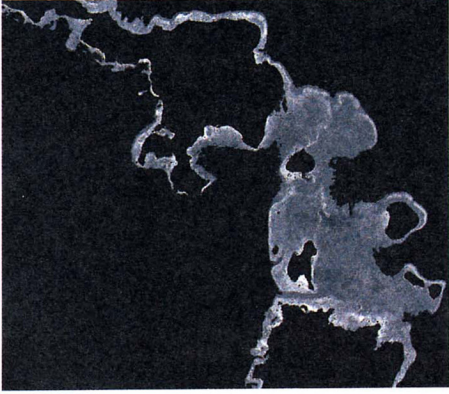
図5. 経験的直行関数のモード1～6の時系列



MODE1(BAND1)



MODE1(BAND2)



MODE1(BAND3)reverse



MODE2(BAND1)



MODE2(BAND2)



MODE2(BAND3)

図6 第1モード・第2モードの空間分布。MODE1のBAND3は見易さのため濃さを反転している

を求める上で相関係数を計算する必要がある。欠測データについては補間を行わずデータ数で補正した。そのため、雲に隠れた情報については、実際にはあったものの解析上現れないことになるので注意が必要である。相関係数を計算する上で、バンド1・バンド2・バンド3の組を1つの点の特徴とみなし一括して扱うか、それとも全く独立に変わる可能性があるともなし、別々に扱うかが問題である。今回はサンゴ相は分光特性で規定できるとしてバンド1・バンド2・バンド3を一つのベクトルとして扱った。この事よりバンド1・バンド2・バンド3間の変動は制約は受けるが、逆に特定の波長分布の変動を抽出できる可能性がある。また、この方法を用いれば、自由度が増加する利点もある。

25 点の時系列からのみではそれぞれのモードの空間的な広がりがわからない。そこで、経験的直行関数による解析で得られた時系列がそれぞれ独立であることを利用し、各ピクセルについてこの時系列によりモード展開をおこない、それぞれのモードの全海域の空間分布を得た。

5. 結果及び考察

図5に第1モードと第2モードの時系列を示す。どちらのモードにも、1998年8月ころに強いシグナルがあり、第2モードが若干遅れている。このシグナルは1998年の白化現象に対応している可能性がある。第1モードは特にピークを持った後回復する過程もあらわしている。一方、1987年・1990年・1996年頃にも強いシグナルを出している。図6に第1モード、第2モードの空間分布を示す。第1モード・第2モードとも、バンド3(赤)の反応が強い。第1モードでは浦底湾・米原・カラ岳北東・底地・小浜島近傍・西表島野原先近傍・西表島仲間崎東において強い反応を示している。また、第2モードについては、浦底湾・米原・カラ岳北東・高那・黒島北等である。第2モードのほうが第1モードより沖合いに強くシグナルが出ているようである。「平成10年度石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリ

ング調査」の白化による死サンゴの比率をみると(図7)、浦底湾・底地等多くの点で第1モード・第2モード特に第2モードと一致しているケースが多い。ただし、川平・屋良部崎では死サンゴが多いにもかかわらず、解析結果では出ていない。また、米原では死サンゴがあまり出ていないにもかかわらず、解析結果では強く出ている。その他のモード、例えば第5モード、第6モード等にも1998年に強いシグナルを示している。しかしながら、それらの空間分布は第1モードと大きな差異は認められない。可能性としては、波長分布が異なっている・分布域が若干異なっている・発現時期・回復割合が異なっている等が考えられるが、明らかではない。

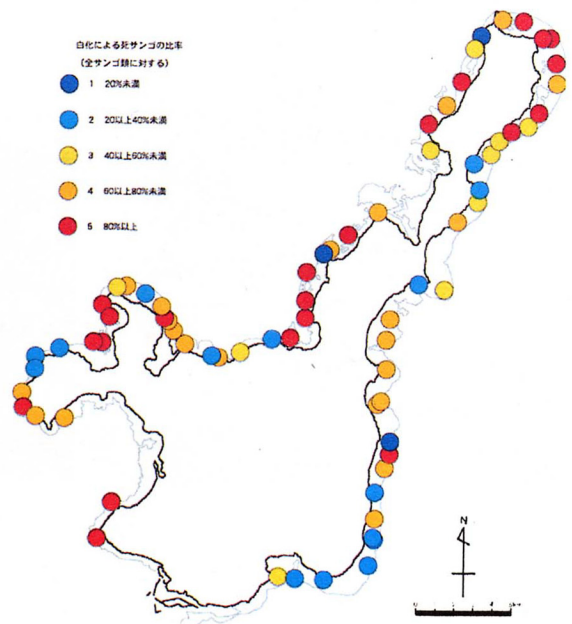


図7. サンゴの死亡率(推定)。
(環境庁自然保護局、1999年)

図8に石垣島近傍の東経123～125度・北緯24～25度の平均表面水温を示す。また、図9に石垣島の気温及び日射量を示す。1998年は夏季に表面水温・気温ともに平年に比べ高く、特に水温は30℃を超えていることがわかる。1988年・1996年も表面水温が高いことが認められるが、1988年に関しては良好な衛星画像が存在しなかったため解析されていないが、1996年に関しては第1モードにシグナルが現れている。高水温の期間は1996年に比べ1998年が長期にわたり続いていることが分かる。日射量でみると、1996年は6月～7月ころ平年に比べかなり高いもののすぐに平年並みになっているのに対し1998年は6月～8月に高くなっている。

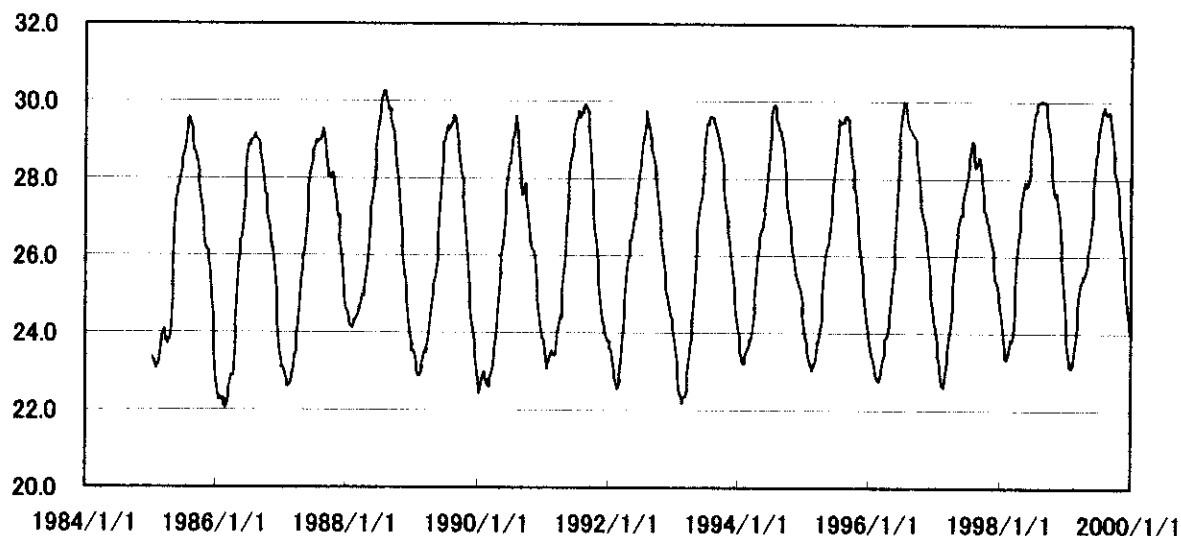


図8. 石垣島近傍の東経123～125度・北緯24～25度の平均表面水温

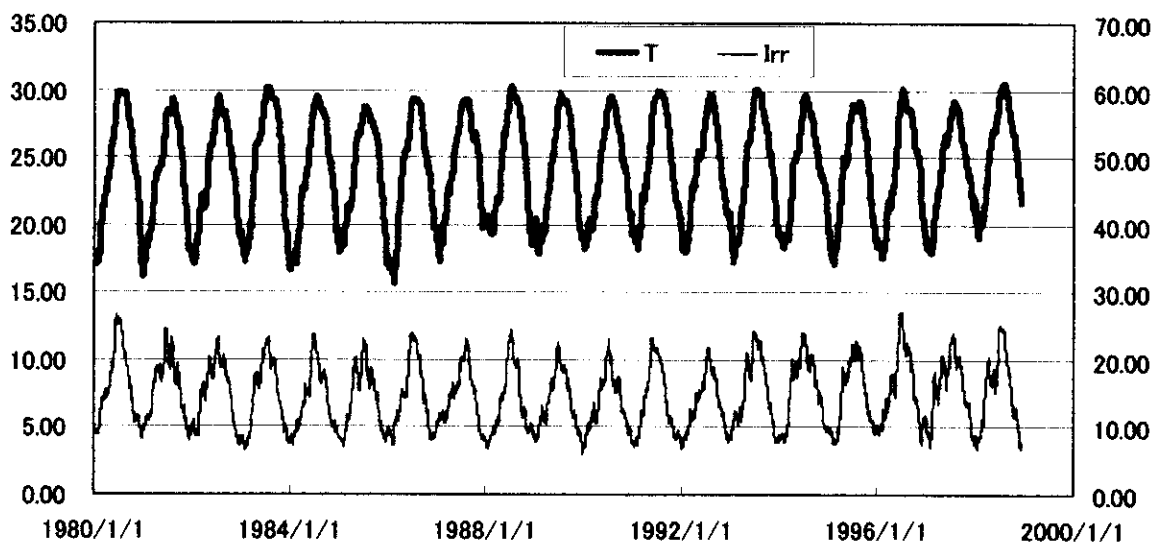


図9. AMEDASによる石垣島の気温及び日射量。左縦軸は気温。右縦軸は全天日射量。

経験的直交関数の第1モードの変動の様子は1982年から1990年にかけて値が増大し、1994年までは減少、その後、再び増大に転じている。これは、1980年代始めにあったオニヒトデによる食害の回復過程を表している可能性がある。衛星画像のみでは特定は困難であるため、他のモニタリングポストのデータと突き合わせて行く必要がある。しかしながら、これらの現象がどの程度の規模で起こっているか、長期的にどうであったかの用途として利用可能である事が明らかとなった。

ここでは、第1モード・第2モードについて1998年のサンゴの白化現象を中心に解析を行った。この他のモードでは長期変動を示しているモードや一時期だけシグナルを示すモード等が存在している。これらを用いれば、さんご礁域の変遷や赤土の流入等による変化に対応した変動も抽出できる可能性を持っている。

6. おわりに

高解像度の人工衛星が打ち上げられることになっている。これらの衛星を用いればさらに細かいスケールの現象が抽出できる可能性がある。衛星打ち上げが遅れ本プロジェクト内では入手できなかったが、空間分解能が4 mであるCARTERRA衛星の画像などを用い、モニタリングに使用可能かを調べるのが今後の課題として残っている。

用いたLANDSAT・TMデータの一部は米国政府所有で、Space Imagin EOSAT／宇宙開発事業団から研究向けデータとして格安で提供していただいたものです。これにより多くのデータ処理できました。また、南西諸島近傍の表面水温については社団法人漁業情報サービスセンターから情報提供を受けました。石垣島の気象データは気象庁から提供を受けました。ここに記し謝辞を表します。

7. 参考文献

環境庁自然保護局（1999年）平成10年度石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリング調査報告書

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

①川崎 清：1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、259(1999)

「衛星画像によるサンゴ礁域のモニタリング」

(2) 論文発表

①川崎 清：海洋生態系システム研究会、(2000)

「高解像度衛星によるサンゴ域の変動解析」