原著論文

水中近距離リモートセンシング法による サンゴ健康度季節変動の評価

斉藤 宏^{1,*}・石丸 隆²・灘岡和夫³・渡邊 敦³

¹ 拓殖大学 国際開発研究所 〒112-8585 東京都文京区小日向 3-4-14

² 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

³ 東京工業大学大学院情報理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

要旨 世界的なサンゴの白化現象が起こり、気候変動が進行する現在、サンゴのモニタリングの必要性が急務である。しかし、モニタリングの手法は目視によるものが基本で、小さい変動はわからなかった。褐虫藻のモニタリングによりサンゴ健康状態をモニタリングできる可能性のある、青色光域と近赤外光域の二つの画像から求めた「サンゴ用正規化植生指標」(NDCI; Normalized Difference vegetation of Coral Index) (斉藤ら 2008) を用いて、石垣島白保サンゴ礁の礁池において 2009-2010 年と 2011-2012 年の 2 年間サンゴの季節変動と日周変動を数値化した。その結果、サンゴの NDCI 値は水温に対しては負の相関を示しながら季節変動していること。サンゴの種類によりその変動幅に違いがあること。高水温ばかりでなく低水温や光量子、流入泥によるストレス等により、季節変動のみならず日周変動も行っている可能性を明らかにした。また、*Porites* sp. の強い白化と弱い白化の可視化、*Favia* sp. の台風の後の NDCI 値の偏りも計測できた。

キーワード モニタリング, 褐虫藻, サンゴ健康度, サンゴ健康度の季節変動, サンゴ健康度の日周変動

はじめに

サンゴは固定された炭酸カルシウムの骨格の中で生活しているが水中のプランクトンを捕食する動物である。同時に、褐虫藻 (zooxanthellae) と呼ばれる渦鞭毛藻類の一種が 1 cm^2 あたり数十万から数百万細胞もの高密度での共生をしている (Yamashita et al. 2011)。褐虫藻は宿主であるサンゴに光合成産物のほとんどを渡し、サンゴはそれをエネルギーとして使い生活している。そのため動物でありながら、まるで植物のように光合成の生産物によりエネルギーのほとんどを得て生活しているのである。

しかし、サンゴは海水温が 30°C を超えてさらに上昇してくると白化を起こす (Hoegh-Guldberg et al. 1989)。 30°C をこえて 34°C 近くになると共生している褐虫藻が光合成をしてエネルギー処理をすることができなくなり、サンゴにとっても有害な活性酸

素を生みだす。そこで、サンゴは褐虫藻を放出することになる。この放出により、サンゴは石灰質の白い地肌が透けて見えるようになり、いわゆる白化という状態に近づいていくことになる (Brown 1997)。世界的なサンゴの白化現象も報告され (Wilkinson 1998) 対策が望まれる。スギノキミドリイシ (*Acropora muricata*) の研究ではこのとき褐虫藻の放出により褐虫藻の密度の減少、それに伴い少なくなった褐虫藻のセルサイズの増加も起こり、結果としてクロロフィル濃度の増加も起こっている。白化の最中と後で褐虫藻の密度とクロロフィルの濃度は負の相関をしていると報告している (Jones 1997)。もともとプランクトン捕食で得るエネルギーは褐虫藻の光合成生産物から得るエネルギーより小さいため、この状態が長く続けば、いわゆる白化の状態となり、サンゴは斃死してしまうことになる。

海水温度が上昇した場合、褐虫藻の密度は減少していくと同時に、光合成の光化学系 II の量子収率、 F_v/F_m も同時に減少していく (Beer et al. 1998, Jones et al. 1998, Okamoto et al. 2005)。つまり、褐虫藻の減少と同時に光合成活性が減少する。

*連絡著者

E-mail: saito@kokusaiken.org

図 1 沖縄県石垣島白保サンゴ礁のモニタリングエリア

Fig. 1 Map of monitoring site. Shiraho coral lagoon, Ishigaki Island

しかし、サンゴは、環境が回復してくると再び褐虫藻を取り込み回復に向かうこともある。また、褐虫藻には遺伝的違いがあり、クレード (clade) と呼ばれ、サンゴの種により適合する褐虫藻クレードがあり、クレードにより高温ストレスに強いものもあると報告されている (Suwa et al. 2008; Pochon et al. 2010)。そうであれば、サンゴの種により *NDCI* の変動が異なり、それぞれが違う温度範囲での変動を行う可能性がある。

環境中において温度ストレス等による褐虫藻の増減やクロロフィル濃度の変化が日常的に起こっているとすると、褐虫藻の持つクロロフィルを検出できるリモートセンシングの方法を水中近距離で適用し、活性を数値化することが可能かもしれない。しかし、水中においては長い波長の光は吸収が大きく距離が長いと感知できなくなる。そこで、距離を短く 1m と定め、さらに、陸上植生指標で使われる赤色ではなく水中でも深くまで残る青色光域と、近赤外光域を効率よく感知できるカメラシステムを使って、*NDCI* (サンゴ用正規化植生指標) を開発し、褐虫藻の密度の増減と細胞内のクロロフィルの濃度を含めた変化を 128 段階に数値化することができた (斉藤ら 2008)。

多くのモニタリングでは、白化の度合いをダイ

バーが目視でカラーチャートと比較して計測する (Siebeck et al. 2006; Siebeck et al. 2008)。この場合、人の目で目視できる面積の白化がある場合は確認ができるが、白化まで至っていない段階での評価は難しい。さらに、サンゴは茶色だけでなく、青や緑や灰色の色素をもつものもあり、それぞれのカラーチャートを選択することも難しい。そこで斉藤ら (2008) は、青色光域と近赤外光域の二つの画像から求めた「サンゴ用正規化植生指標」(*NDCI*; Normalized Difference vegetation of Coral Index) を定義した。*NDCI* は量子収率 F_v/F_m との相関が高いため、サンゴの健康度を示す可能性がある。*NDCI* を用いた計測システムは、光学フィルターで青色光域と近赤外光域だけを選択的に取得するためサンゴの色の違いには計測結果が影響されない。また、良く使われる PAM での計測では、まだら状に白化している場合等、わずかな計測ポイントの違いにより値が大きく変わるため、多数のポイントを計測しなければならず多くの時間がかかる。本研究では、サンゴのモニタリングに *NDCI* を用い数値化することで、従来の方法の弱点を補う目的で計測を継続した。2009-2010 年の 1 年間と 2011 年から 2012 年の 1 年間の 2 回、石垣島、白保のサンゴ礁、礁池 (Fig. 1) でのターゲットと決めたサンゴ群集

のモニタリングを行い、サンゴの *NDCI* が季節変動をしていること、日周変動もしていることと、海水温上昇によるストレスだけでなく、海水温低下によるストレスや光量子、赤土等の泥ストレスにも反応している可能性が明らかになった。

材料と方法

対象とするサンゴ群体は石垣市の白保地先の礁池内 (Fig. 1) で、白保海岸入口の砂浜から正面およそ 130m 程度に位置している。通常水深 2m 前後で大潮等の干潮では水深 1m 程度となる場所に設定した。ユビエダハマサンゴ (*Porites cylindrica*)、塊状ハマサンゴの仲間 (*Porites* sp.) とアオサンゴ (*Heliopora coerulea*) が並んでいるサンゴ群体の内 *Porites* sp. と *Heliopora coerulea* そのすぐ前にあるキクメイシの仲間 (*Favia* sp.) の 3 群体を対象とした。白保の計測ポイント周辺にはこの 3 種は多く生息している (Kayanne et al. 2002)。また、*Porites* sp. も *Heliopora coerulea* もミドリイシ系の枝サンゴが斃死したあとでも生存が確認されており、白化に強いというモニタリング結果 (大見謝ら 2000; Loya et al. 2001; 岩尾ら 2007; 前川ら 2007) が多く、礁池のビーチ近くまで広く生息しているため、モニタリングの基準サンゴとして活用できる。

サンゴに標準白色板 (EVER-color) をつるし、水中で 1m の距離に三脚で固定したナイトショット機能を持つデジタルカメラ (Sony, DSC-V1) をナイトショット機能を使えるように専用で制作した水中ハウジング (DVI 制作) にいれて撮影を行った。1m の距離に関しては、水中での赤外線吸収のレベルと水中でのサンゴ群体とサンゴ群体の密集度を考慮して決定した (斉藤ら 2008)。青色光域フィルター (Schott, BG12Blue バンドパスフィルター) とともに、ナイトショットモード (近赤外域での感度を上げたモード) に切り替えて近赤外光域フィルター (Schott, RG715 Ir shortcut-filter) を専用の手動フィルターチェンジャーで交換できるようにして、各フィルター画像 2 枚と、フィルターを用いない普通カラー撮影の計 3 枚の画像を撮影した。普通カラー画像は目視での状態を比較確認するために用いた。必須な画像はこの 3 枚であるが、波による光のグリッターの影響を考慮するため、それぞれの画

像は 3~4 枚ずつ撮影しておき、解析の時に組み合わせを変更できるようにした。

2009 年 7 月, 8 月, 10 月, 2010 年 1 月, 5 月, 6 月, 7 月と, 2011 年 8 月, 10 月, 2012 年 1 月, 6 月と, それぞれ 1 年間の中で季節の変化に合わせて数回にわたり計測を行った。各月の計測日においては, 10 時前後から 15 時前後までおよそ 1 時間ごとに計測を行い, 日周変動を計測した。各計測日のサンゴの種類ごとに *NDCI* 値を平均してその月の *NDCI* とし, 季節変動を算出した。計測場所の近傍の水温に関しては, 東京工業大学灘岡研究室が年間を通じてモニタリングしている水温のデータを使用した。また, 日周変動と光量との関係を調べるため, 計測の時には, 光量子計をサンゴの横の海底に設置し, 光量との関係も調べた。

2012 年 6 月 2 日から 3 日にかけての日周変動の計測時は, 石垣地方に台風が接近し, 3 日に最も近づく天候であった。時折台風による雨が降るが 2 日はおおむね晴れ曇りの天候で最高気温と最低気温はそれぞれ 30.5℃ と 25.2℃, 風は北東 3m/s で計測には支障はなかった。一方, 3 日は曇り雨で最高気温と最低気温はそれぞれ 29.4℃ と 25.4℃, 風は急に強くなり北東 7m/s で風による流れが強くなり午後に計測を中止した。

画像解析による *NDCI* 値の計算は, リモートセンシングの植生指標の画像解析の技術 (杉田 2003; 田中ら 2003; Yamano et al. 2003; 灘岡ら 2004; 松永ら 2005) に基づき, 水中でも解析できるように考案したものである。近赤外域画像と青色域画像を位置合わせしたと同じ大きさの画像にそろえ, グレースケール画像に変換した上で画像処理ソフト Image++ を使い, (斉藤ら 2008) による画素演算式

$$NDCI=128\times$$

$$(a\times\text{近赤外}-\text{青})/(a\times\text{近赤外}+\text{青})+128$$

(ここで, a は近赤外と青の感度調整係数であり, a = 青の白板 digital number [DN] 値/近赤外の白板 DN 値)

に基づき画素演算を行った。処理された合成画像の白板の上部の計測エリアから DN 値の平均値と標準偏差をデータとして用いた。

1 つの画素に対して 8 ビットでの処理を行っており, 階調情報は 256 段階で, これが DN 値となる。計算式中の「近赤外」は近赤外光域フィルターを用

いナイトショット機能で撮影した画像のDN値, 「青」は青色光域フィルターを用いて普通カラー撮影による画像をグレースケールに変換し求めたDN値である。それぞれ2590×1944ピクセル(約500万)の画素数の画像を用いた。二つの画像の画素は平面的に1つずつ対応しており, 同じ位置の画素すべてに関してそれぞれNDCI演算を行っている。演算式右辺前半の正規化した値は-1から1の範囲をとり, 0から1の間の値では一般的に植生があると判断されることから, +128処理を加え128から256までをシュードカラー変換を行った。計測波長域すべてに対して一様な反射をする標準白色板は植生無しと判断されるため, 近赤外域と青色域の感度調整の基準とし, 天候等により強度の異なる光環境下での計測値のキャリブレーションを行った。正規化した値が負の部分はシュードカラーですべて黒色にした。

結果と考察

サンゴのNDCI季節変動について

Porites sp., *Heliopora coerulea*, *Favia* sp. のNDCIの2009-2010年1年間と2011-2012年の1年間の季節変動を, Fig. 2とFig. 3に示す。計測は各計測日の9時から15時ごろまでの計測値平均をプロットしたものである。各計測日ごとに3種の変動は分散分析で検定し, 各計測日すべてで有意差($P < 0.05$)が認められた。*Favia* sp.に関しては, 2009年の7月, 8月の計測はしていない。海水温の傾向をみるため, NDCIグラフに海水温の月平均のグラフを重ねた。2009-2010の計測によると*Heliopora coerulea*, *Favia* sp. は, 1月頃にNDCIが高く, 7月, 8月頃が低い。*Porites* sp. は2009-2010年では1月にも低くなったが, 2011-2012年(Fig. 3)では*Heliopora coerulea*, *Favia* sp. と同じ傾向を示した。この違いを考えるため, 海水温の日平均との相関係数(Table 1)にまとめた。相関係数のt検定も行い, 有意水準($P < 0.05$)において2009-2010の*Porites* sp. 以外はすべて有意である。相関グラフをFig. 4に示す。回帰直線を重ねた。2011-2012年では3種ともNDCIと海水温は強い負の相関を示す(つまり海水温の上昇に対してNDCIは低くなる。これは, 2009-2010年(Fig. 2)の*Favia* sp. と*Heliopora*

*coerulea*においてもほぼ同じ傾向で負の相関であった。*Porites* sp. については夏だけでなく水温の低い1月もNDCIが下降を示したので相関はなかった。2009-2010の計測と2011-2012の計測ごとにNDCIとの相関図を(Fig. 4a, b)に示す。相関図には回帰直線を重ねた。

Porites sp. だけが海水温との負の相関がみられなかった理由を考察するため, 各計測年の海水温の日平均を重ねてプロットしてみると(Fig. 5), 海水温は1月前後が最も低温になる期間であり, 7月, 8月が高温となるサイクルであることがわかる。このとき, 両者を詳細に比べてみると, *Porites* sp. のNDCIが低下した直前の2009-2010年の12月から1月にかけて, 日平均のグラフでは水温が15℃まで大きく下げていることがわかり, 低水温ストレスが考えられる。低水温ストレスは12℃から18℃の間で起こり, 12℃と14℃の間では多くの種で褐虫藻の放出が起こるが16℃と18℃の間でも種類による放出が増えることが報告されており, 低水温ストレスによる放出を示したサンゴには*Porites porites*が含まれている(Muscatine et al. 1991)。また, 年間の水温平均は2009-2010年は25.70℃, 2011年は26.03℃であり, わずかではあるが2009-2010年の方が低い。これから*Porites* sp. は低水温ストレスにも敏感に反応しているのではないかと考えた。なお, *Porites* sp. について2010年1月のNDCIが下がっていることは, 計測のときに同時に撮影している通常のカラー可視画像で茶色がかかなり薄くなっており, 計測ミスではないと考えられる。一方, *Favia* sp. と*Heliopora coerulea*は, 低温ストレスに対する反応はみられなかった。2011-2012年の1月の計測においても, モニタリングサンゴの近傍15mほどのところにある別の*Porites* sp. (Fig. 11a)に弱い白化の傾向が出ており, *Porites* sp. の低温ストレスへの反応は高温ストレスと同様に特別なことではないと考えられる。ここまでの結果から, サンゴのNDCIは種による変動の違いはあるものの年間を通じて水温が大きく関係して変動していることが明らかとなった。

サンゴの日周変動について

季節変動に加え, 日周変動を調べるため, 石垣地方に台風が接近し通過した2012年6月2日(Fig. 6)と6月3日(Fig. 7)の日周変動を解析した。

図 2 2009 年から 2010 年の 3 種のサンゴの *NDCI* (サンゴ用正規化植生指標) と海水温の変化
 Fig. 2 Seasonal variation of *NDCI* of three coral species and seawater temperature (mean $\pm$ SE, 2009-2010). There was significant difference in *NDCI* values among the three coral species on each measurement day (ANOVA, $p < 0.05$)

図 3 2011 年から 2012 年の 3 種のサンゴの *NDCI* (サンゴ用正規化植生指標) と海水温の変化
 Fig. 3 Seasonal variation of *NDCI* of three coral species and seawater temperature (mean $\pm$ SE, 2011-2012). There was significant difference in *NDCI* values among the three coral species on each measurement day (ANOVA, $p < 0.05$)

図 4 a) 3 種サンゴの 2009 年から 2010 年の *NDCI* と海水温の相関図, b) 3 種サンゴの 2010 年から 2011 年の *NDCI* と海水温の相関図

Fig. 4 a) Correlation of seawater temperature and *NDCI* of three coral species; regression lines also shown (2009–2010), b) correlation of seawater temperature and *NDCI* of three coral species; regression lines also shown (2010–2011)

NDCI 値は各計測時間ごとに 3 種を分散分析で検定し, 各計測時間すべてにおいて有意な差が認められた。($P < 0.05$) 6 月 3 日の午後は風や流れが激しくなったので計測を中断した。

Fig. 6 では *NDCI* はサンゴ 3 種とも正午から 13 時ごろを底とする鍋底型のグラフを示す。正午前後の水温は, サンゴにとって白化が起こるといわれている 30°C を超えていた。6 月 4 日が大潮で 6 月 2 日は 11:35 分が干潮で潮位 120 cm, サンゴの上部と水面に近い状態で潮が止まり, しかも風が弱いため吹送流も起こらず水温が上昇したためであると考えられる。相関係数, (Table 2) は弱い, 季節変動で明らかになった, 海水温との負の相関が日周変動においても弱いながら反応していると考えられる。相関係数の検定では有意水準 ($p < 0.05$) において *Porites* sp. と *Heliopora coerulea* は有意であるが, *Favia* sp. は有意とは言えなかった。

当日の光量子計の 10 分ごとの平均データと *NDCI* の相関係数に基づくと, 光量子との相関係数 (Table 2) は有意水準 ($p < 0.05$) において *Favia* sp. と *Heliopora coerulea* は有意であるが, *Porites* sp. は有意とは言えなかった。*Porites* sp. を除き水温との相関よりも強い負の相関を示した。

翌日 3 日の海水温との相関係数は検定では有意水準 ($p < 0.05$) において *Porites* sp. と *Favia* sp. は強い負の相関で有意であったが, *Heliopora coerulea* は有意とは言えなかった。ところが光量子との相関係数 (Table 2) は正の相関に変化した。相関係数の検定では有意水準 ($p < 0.05$) において *Porites* sp. と *Favia* sp. は有意であったが, *Heliopora coe-*

表 1 各計測年における 3 種サンゴの *NDCI* と海水温の相関係数 (n はサンプル数, (n.s.)¹ は相関なしを示す)

Table 1 Correlation coefficient of seawater temperature and *NDCI* showing strong negative correlation, except for *Porites* sp. (2009–2010). Result of the t-test of the correlation coefficient, except *Porites* sp. (2009–2010), is significant ($p < 0.05$); (n.s.)¹ - not significant

<i>NDCI</i> -Seawater Temp.			
	<i>Porites</i> sp.	<i>Heliopora coerulea</i>	<i>Favia</i> sp.
n	32	28	13
2009–2010	-0.008(n.s.) ¹	-0.715	-0.806
n	29	29	18
2011–2012	-0.819	-0.824	-0.780

図 5 各計測年におけるモニタリングエリアの海水温の変化を重ねた図

Fig. 5 Comparison of average daily seawater temperature change in the measurement area during the two years of the study

図 6 2012 年 6 月 2 日における 3 種サンゴの NDCI の日周変動と海水温の変化

Fig. 6 Diurnal variability of each coral NDCI and seawater temperature June 2, 2012 (mean $\pm$ SE). Seawater temperature exceeded 30° when tide stopped around noon. The three coral species tested with ANOVA all exhibited significant difference in all tests ($p < 0.05$)

June 3

図 7 2012 年 6 月 3 日における 3 種サンゴの *NDCI* の日周変動と海水温の変化（台風の通過に伴い午後の計測は中断した。）

Fig. 7 Diurnal variability of each coral *NDCI* and seawater temperature June 3, 2012 (mean $\pm$ SE). Measurement was in the morning only before the passage of the typhoon. Water temperature dropped because of strong currents. The three coral species tested with ANOVA all exhibited significant difference in all tests ($p < 0.05$)

表 2 2012 年 6 月 2 日, 3 日における 3 種サンゴの *NDCI* と海水温の相関係数と *NDCI* と光量子との相関係数 (n はサンプル数, (n.s.)¹ は相関なしを示す。)

Table 2 Correlation coefficients of *NDCI* and sea temperatures, and *NDCI* and light-quantum: (n.s.)¹ - not significant

Correlation coefficient				
	2012/6/2	<i>Porites</i> sp.	<i>Heliopora coerulea</i>	<i>Favia</i> sp.
Seawater temp. (n=18)		-0.502	-0.582	-0.441(n.s.) ¹
Light-quantum (n=18)		-0.352(n.s.) ¹	-0.715	-0.609
	2012/6/3	<i>Porites</i> sp.	<i>Heliopora coerulea</i>	<i>Favia</i> sp.
Seawater temp. (n=8)		-0.858	0.294(n.s.) ¹	-0.977
Light-quantum (n=8)		0.804	0.442(n.s.) ¹	0.732

rulea は有意とは言えなかった。

これまでの結果から、海水温との関係は基本的には負の相関を示した。2 日のように海水温度がすでにサンゴ生存にとって厳しい温度になったときに、光量子の上昇は光合成には関係しないが、3 日のように海水温は正常であるが、ほとんど曇り雨で光量

子が少ない環境においては光合成には光量子の増加が必要なためと考えられる。6 月 2 日, 3 日の *NDCI* と水温, 光量子との相関図を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。

NDCI 季節変動のグラフから、今回計測した 3 種のサンゴの *NDCI* 値の変動範囲が明らかになった。これまでの結果から、目視で白化と確認できたとき

図 8 a) 2012 年 6 月 2 日における 3 種サンゴの *NDCI* と海水温の相関図, b) 2012 年 6 月 2 日における 3 種サンゴの *NDCI* と光量子の相関図

Fig. 8 a) Correlation of seawater temperature and *NDCI* of three coral species (June 2, 2012), b) correlation of light quantum and *NDCI* of three coral species (June 2, 2012)

では *Porites* sp. や *Favia* sp. では *NDCI* 値が 150 前後となる (齊藤ら 2008)。*Heliopora coerulea* の白化の現場にはまだ遭遇しておらず, *Heliopora coerulea* の白化時の *NDCI* を計測していないため現状ではわからないが, *Favia* sp., *Porites* sp. は今までの計測から季節変動での上限がおよそ 180 後半から

図 9 a) 2012 年 6 月 3 日における 3 種サンゴの *NDCI* と海水温の相関図, b) 2012 年 6 月 3 日における 3 種サンゴの *NDCI* と光量子の相関図

Fig. 9 a) Correlation of seawater temperature and *NDCI* of three coral species (June 3, 2012), b) correlation of light quantum and *NDCI* of three coral species (June 3, 2012)

140 後半までの変動幅で動いていると考える。しかし, サンゴの白化が目視で確認されたとしても, *NDCI* は 150 前後で (齊藤ら 2008), サンゴが斃死すると考えられる 128 (植生ゼロ) より大きく, その原因となった環境が回復すれば, 褐虫藻が戻りサンゴの健康度は再び回復することもあることを示唆している。それゆえに, サンゴのモニタリングは対策をおこなうためにも数値化は有効であろう。

モニタリングの間に計測された現象と *NDCI* の関係
Porites sp. (塊状ハマサンゴ) の白化例 (2009 年 8 月)

真白色で完全に白化している *Porites* sp. (Fig.

10a 右) と、波で転がされたばかりの別の *Porites* sp. (Fig. 10a 左) を比較してみたシュードカラーで可視化した画像 (Fig. 10b) をを比較した。*NDCI* 値の平均は転がった正常 *Porites* sp. が 179.3 で白化ハマサンゴが 145.7 であった。*NDCI* 値は DN (デジタルナンバー) 255 の半値 128 が植生ゼロであることから、白化しても 145.7 であることは、まだ褐虫藻は完全には離脱していないことを示しており、この後の環境によっては白化から回復する可能性もあると考えられる。

低水温による *Porites* sp. (塊状ハマサンゴ) の弱い白化例

2012 年 1 月に、モニタリングサンゴの 15m 程度の距離にある *Porites* sp. の弱い白化状態を計測することができた。Fig. 11a と Fig. 12a は同じ *Porites* sp. である。1 月 30 日の弱い白化 (Fig. 11a) とそのシュードカラー画像 (Fig. 11b) と比較すると、6 月 3 日 (Fig. 12a) では *Porites* sp. がかなり回復しているように見える。この弱い白化部分の *NDCI* 値の計測結果は、1 月 30 日では平均値 167.9、6 月 3 日のやや白っぽく見える部分の平均値は 174.6 であった。1 月の弱い白化は低水温ストレスが原因である可能性がある。低水温ストレスによる褐虫藻の放出は 18℃ 以下から増加すると報告されている (Muscatine et al. 1991)。数値化だけでなくシュードカラー化して比較 (Fig. 11b と Fig. 12b) すると変化部位が一目で理解できるため、サンゴの現状の説明には効果的であろう。

Favia sp. の台風の後の *NDCI* の偏り

2009-2010 年の計測の中で、10 月 25 日の計測において *Favia* sp. で興味深い結果が得られた。石垣島台風通過に伴い 10 月 23 日には 17 時、18 時には 30mm を超える降水量で合計 119.5mm も降り 10 月中では最大の降水量となった。最高気温と最低気温はそれぞれ 30.4℃ と 23.5℃ を計測された。24 日になると 10mm 程度の雨で合計 74.5mm が一日中降っている。気温は max.25.5/min.23.3 風は 24 日に強くなり 10m/s を超える北北東の風が一日中吹いた。25 日も午前中は 10m/s 前後で夜にかけて 7m/s ほどに下がっていく。計測は 25 日に実施した。24 日はサンゴ礁の海が泥水のような状態 (Fig. 13) で透明度が全くなかった。その時に大量の赤土等の泥

が流れ流入泥ストレスが発生したと考えられる。

Fig. 14 は翌 25 日に透明度が戻った時の *Favia* sp. のカラー普通画像である。この時の計測で *NDCI* 値をシュードカラー処理した可視化画像 (Fig. 15a) を示す。このように *NDCI* が偏った現象は初めて観察された。通常は 2010 年 6 月の *Favia* sp. (Fig. 15b) のように均一な *NDCI* 値分布となるが、25 日の計測では偏った *NDCI* の分布を示した。これに関しては流れの方向に対して向かう面と裏になる面では流入泥によるストレスが違うためと考えている。このように、サンゴは多様な環境変化に対して日々反応している可能性がある。

モニタリング計測で注意する点及び発展

本手法により開発途上国や小島嶼開発国などサンゴ礁がありながらモニタリングに費用をかけられない地域においても安価で簡易にサンゴの *NDCI* をモニタリングし、数値化することが可能となる。

今後は、①青画像と近赤外画像の 2 画像同時撮影により、三脚なしの手持ちでの計測を可能にすること、② 2 画像ビデオシステムで常時モニタリングを行えるシステムを開発すること、③画像解析の自動化ソフトを開発すること、へと研究を進展させていく予定である。現段階でシステムを安定して使うための注意点を以下にまとめる。

- このシステムは太陽光の反射光を計測するため、日中であればいつでも使えるが、太陽高度の大きい方が計測値が安定する。10 時から 15 時の間を推奨する。
- 海水面のさざ波により目視でわかるような強い光の帯 (グリッター) がサンゴの一部に入った場合、現在のシステムでは、近赤外域画像と青色域画像を 2 回に分けてとっているため、このグリッターによる計測値の違いを補正することができない。そのため、同じ画像を 3-4 枚程度とることで、解析の時にその影響がない画像を使い解析することになっている。次のシステムとして、同時軸で同時撮影ができるシステムの改造を行い、すでに並行してデータ取得を行って検証を進めつつある。この新しいシステムによりグリッターの影響の軽減が見込まれる。また、同時に撮影するため三脚で

図 10 a) 波で転がされたが健康な *Porites* sp. (左) と白化している小さな *Porites* sp. (右), b) NDCI 解析による画像 (左は平均 NDCI=179.3, 右は平均 NDCI=145.7, 2009 年 8 月撮影)

Fig. 10 a) Healthy *Porites* sp. (left) rolled by waves, and bleached small *Porites* sp. (right) (August 2009), b) NDCI analysis picture showing healthy *Porites* sp. (black line) Avg. NDCI=179.3, bleached *Porites* sp. (red line) Avg. NDCI=145.7

固定する必要が無くなると期待される。

- サンゴ礁のある地域では、太陽高度の小さい冬期や、直達光の届かない曇りの場合でも十分な光量がある。強いグリッターを避けるため、晴天時より太陽が雲に隠れている曇りや小雨の条件の方が安定した結果を得やすい。晴天の条件でも雲が太陽を隠している際に計測を行うことを推奨する。
- 礁池においては、低干潮となり潮が止まり、濁りが出てきたときの計測値は利用しない方がよい。濁りは光の散乱が激しいうえ、潮が止まると海水温度の上昇も起こるためである。
- 標準白色板 (酸化マグネシウムや硫酸バリウム等

図 11 a) 2012 年 1 月における *Porites* sp. の低水温ストレスによると見られる弱い白化, b) NDCI 解析による画像 NDCI は平均 167.9

Fig. 11 a) Same species which is located near the monitored *Porites* sp. showing weak bleaching due to cold stress (January, 2012), b) NDCI image analysis of *Porites* sp. Avg. NDCI=167.9

を固めた素材でできており、可視域から近赤外域に対して一様に 100% の反射率を持つ) は、画像の中心に配置し、解析は白色板の近傍の画素を用い、さらに陰を避けるため、左右と上部の画素値を使用するべきである。標準白色板は高価であるため、それに変わる素材 (サンゴ骨格、素焼き板、セラミック板等) を比較使用できる可能性がある。

■目測ではなく 1m のロープを三脚に巻き付けておき、正確な距離で計測して安定したデータを取得する必要がある。距離の変化は近赤外反射光の到達に大きな変化をもたらす。

謝辞

この研究を続けるにあたり、現地白保での計測に

図 12 a) 2012 年 6 月における図 11 と同じ *Porites* sp. 弱い白化が回復に向かっている。b) *NDCI* 解析による画像 *NDCI* は平均 174.6 となった。

Fig. 12 a) Measured in June, 2012, same *Porites* sp. as in Fig. 11a; weak bleaching is recovering, b) *NDCI* image analysis of *Porites* sp. Avg, *NDCI* = 174.6

図 13 2009 年 10 月 24 日の台風通過に伴う流入泥により泥水のような白保サンゴ礁

Fig. 13 Overview of Shiraho inner reef giving impression of muddy water following the passage of the typhoon (October 24, 2009)

図 14 2009 年 10 月 25 日台風通過による濁りから透明度が戻ったところで撮影した *Favia* sp. の可視画像

Fig. 14 Visible image of *Favia* sp. showing that muddiness had subsided the day after the passage of the typhoon (October 25, 2009)

図 15 a) 図 14 の *Favia* sp. の *NDCI* 解析を見ると一方に偏った画像となった。b) 他の日の同じ *Favia* sp. は通常、図のように均一な分布を示す

Fig. 15 a) *NDCI* analysis image (October 25, 2009) showing partial deviation, b) normal *NDCI* analysis image (June, 2010) showing uniform distribution

においては東京工業大学灘岡研究室の皆様には、光量子計の機材準備やデータ取り出し、ブイの設置等をはじめ研究継続のためなくてはならない協力をいただき、研究の精度を高めることができたことは感謝に堪えない。また、計測器材の東京でのテストには葛西臨海水族園のサンゴ水槽の使用が欠かせなかった。水槽使用を認めてくれた森真朗氏はじめ協力してくれた飼育係職員の皆さんのおかげで東京で予備実験ができ現地での計測を無駄にしないで済んだことに感謝したい。この研究は、可視と近赤外の2種の画像を撮ることができる専用のカメラハウジングを、希望の設計図通りに毎回制作してくれている(株)DIVの工藤昌男氏の技術協力なしには完結できなかった。あらためて篤くお礼申し上げたい。

参考文献

- Beer S, Ilan M, Eshel A, Weil A, Brickner I (1998) Use of pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry for in situ measurements of photosynthesis in two Red Sea faviid corals. *Mar Biol* 131: 607-612
- Brown BE (1997) Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16: S129-S138
- Hoegh-Guldberg O, Smith GJ (1989) The effect of sudden changes in temperature, light and salinity on the population density and export of zooxanthellae from the reef corals *Stylophora pistillata* Esper. and *Seriatopora hystrix* Dana. *J Exp Mar Biol Ecol* 129: 279-303
- 岩尾研二, 谷口洋基 (1999) 阿嘉島マエノハマにおける白化した造礁サンゴの回復および死亡過程の報告. *みどりいし* 10: 23-28
- Jones RJ (1997) Changes in zooxanthellae densities and chlorophyll concentrations in corals during and after a bleaching event. *Mar Ecol Prog Ser* 158: 51-59
- Jones RJ, Hoegh-Guldberg O, Larkum AWD, Schreiber U (1998) Temperature-induced bleaching of corals begins with impairment of the CO₂ fixation mechanism in zooxanthellae. *Plant Cell Environ* 21: 1219-1230
- Kayanne H, Harii S, Ide Y, Akimoto F (2002) Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus, NW Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* 239: 93-103
- Loya Y, Sakai K, Yamazato K, Nakano Y, Sambali H, van Woesik R (2001) Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecol Lett* 4: 122-131
- 前川 聡, 鈴木智子 (2007) 2007 年夏季の白保サンゴ礁におけるサンゴの白化の現状と被度の変化. WWF サンゴ礁保護研究センター, 石垣市
- 松永恒雄, 山野博哉 (2005) サンゴ礁. 資源・環境観測解析センター編 資源・環境リモートセンシング実用シリーズ5 地球観測データの利用 (2). 資源・環境観測解析センター, 東京, pp 35-43
- 灘岡和夫, Paringit EC, 山野博哉 (2004) サンゴ礁のリモートセンシング. 環境省, 日本サンゴ礁学会編 日本のサンゴ礁. 環境省, 東京, pp 95-106
- Muscantine L, Grossman D, Diono J (1991) Release of symbiotic algae by tropical sea-anemones and corals after cold shock. *Mar Ecol Prog Ser* 77: 233-243
- 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: 847-854
- 大見謝辰男, 仲宗根一哉, 満本裕彰, 上原陸男, 大城 哲 (2000) サンゴの赤土汚染耐性と白化耐性の比較. *沖縄県衛生環境研究所報* 34: 69-76
- Pochon X, Gates RD (2010) A new *Symbiodinium* clade (Dionophyceae) from soritid foraminifera in Hawaii *Mol Phylogenet Evol*. 56: 492-497
- 斉藤 宏, 岸野元彰, 石丸 隆, 灘岡和夫, 工藤栄 (2008) 可視, 近赤外画像によるサンゴの健康度モニタリング手法の開発. *日本サンゴ礁学会誌* 10: 47-57
- Siebeck UE, Marshall NJ, Kluter A, Hoegh-Guldberg O (2006) Monitoring coral bleaching using a colour reference card. *Coral Reefs* 25: 453-460
- Siebeck UE, Logan D, Marshall NJ (2008) Coral-Watch - a flexible coral bleaching monitoring tool for you and your group. *Proc 11th Int Coral Reef Symp*: 1392
- 杉田幹夫 (2003) 植生指標. 資源, 環境解析センター編 資源, 環境リモートセンシング実用シリーズ

3 地球観測データからの情報抽出. 資源, 環境解析センター, 東京, pp 84-94

Suwa R, Hirose M, Hidaka M (2008) Seasonal fluctuation in zooxanthella genotype composition and photophysiology in the corals *Pavona divaricata* and *P. decussata*. Mari Ecol Prog Ser 361: 129-137

田中邦一, 青島正和, 山本哲司, 磯部邦昭 (2003) フォトショップによる衛星画像解析の基礎 手軽にできるリモートセンシング. 古今書院, 東京

Wilkinson CR (1998) The 1997-1998 Mass bleaching event around the world. In: Wilkinson CR (ed) Status of coral reefs of the world: 1998. Australian Institute of Marine Science, Queensland,

pp 15-38

Yamano H, Tamura M, Kunii Y, Hidaka M (2003) Spectral reflectance as a potential tool for detecting stressed corals. Galaxea, JCRS 5: 1-10

Yamashita H, Suzuki G, Hayashibara T, Koike K (2011) Do corals select zooxanthellae by alternative discharge? Mar Biol 158: 87-100

2012 年 10 月 10 日 受領

2013 年 11 月 8 日 受理

© 日本サング礁学会

Original paper

Evaluation of seasonal variation of coral health using underwater short-distance remote-sensing method

Hitoshi SAITO^{1*}, Takashi ISHIMARU², Kazuo NADAOKA³,
and Atsushi WATANABE³

¹ Institute for International Development, Takushoku University, 3-4-14, Kohinata, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8585, Japan

² Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 152-8552, Japan

³ Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

* Corresponding author: H. Saito

E-mail: saito@kokusaiken.org

Communicated by Hiroya Yamano (Environment and Conservation Editor)

Abstract Monitoring the health of coral is imperative following the global coral-bleaching episode that occurred in 1998, and because climate change is ongoing. However, the usual method employed to monitor coral is visual inspection, which is unable to determine some fine-detailed changes. It is known that symbiotic zooxanthellae supply coral with many nutrients and cause some changes in the reflection spectrum of the coral. Thus, we believe it is possible to monitor coral by monitoring zooxanthellae. By performing pixel operations on two pictures, taken in blue and near-infrared light, a “normalized difference vegetation index for coral” (hereafter referred to as *NDCI*) can be defined. Measuring photosynthetic activity by PAM, in the same area as measured by *NDCI*, shows high correlation between F_v/F_m and *NDCI* (Saito et al. 2008). We used this system to obtain estimates of the seasonal and diurnal variations of coral and converted them into numbers using the *NDCI*. The measurements of coral in this investigation were performed on the Ishigaki Island Shiraho reef during 2009–2010 and 2011–2012. It was found that seasonal variation of the *NDCI* value shows an inverse correlation with water temperature. Furthermore, the seasonal variation in the range of the *NDCI* value was found to depend on the species of coral. We conclude that coral exhibits change, both seasonally and diurnally, in response to low and high temperature, stress induced by light levels, and incursions of mud. Interestingly, we can also report that we observed strong and weak bleaching and deviations of the *NDCI* value following the passage of a typhoon.

Keywords: monitoring, zooxanthellae, coral health, seasonal variation of coral, diurnal variability of coral

Received: 10 October 2012/Accepted 8 November 2013

© Japanese Coral Reef Society