

航空機リモートセンシングによるサンゴ白化分布域の調査法に関する研究

佐々木保徳^{*1} 小山 登^{*1} 山本 浩文^{*1}
工藤 君明^{*2} 保坂 三郎^{*3}

本研究では、サンゴ礁の白化度や分布域の調査を迅速、かつ広域的に行うための方法として、人工衛星よりも地表解像度の高い航空機リモートセンシングにつき検討した。航空機観測は、沖縄県慶良間諸島阿嘉島周辺海域において海上踏査観測に併せて実施した。当海域のサンゴ礁には砂質海底や岩石海底が入り混じり、大きさも数m程度である。したがって、現状ではサンゴ礁の白化分布観測を画一的に行うことは困難であるが、現在一般に用いられる航空機用可視マルチスペクトルスキャナーの画素の大きさは高度 2000 mで約 5m × 5mであり、この高度以下での画素観測なら可能である。当海域のサンゴ礁は白化からすでに完全に回復し、反射光強度の白化度に対する依存性を求めるのは困難であった。一方、サンゴ起源と考えられる砂質海底は、別に予備的に航空機観測した沖縄本島北西部の完全白化サンゴ礁と同様の反射特性を示した。そこで、阿嘉島周辺海域の観測画像から種々の比率でサンゴ礁とサンゴ海底砂が入り混じる画素を抽出し、サンゴ海底砂部分の比率から模擬白化度を与え、これに対する反射光強度を求めた。その結果、両者の間には3バンドとも直線の関係が認められた。これにより、可視域を利用してサンゴ礁の白化度の航空機観測が可能であると結論できる。

キーワード：サンゴ、白化、沖縄、航空機、リモートセンシング

Study of surveillance method of coral bleaching area by aircraft remote sensing

Yasunori SASAKI^{*4} Noboru KOYAMA^{*4} Hirofumi YAMAMOTO^{*4}
Kimiaki KUDO^{*5} Saburo HOSAKA^{*6}

The purpose of this study is to discuss the potential application of airborne observation of higher ground resolution than satellite observation to coral reef bleaching as quick and wide area observation method. The airborne observation was made with sea truth observation around Akajima Isl. The coral reef exists with sandy or rocky bottom and mean size is about several meters, therefore, continuous pattern mapping is still difficult, however, pixel observation is possible, since pixel size of airborne multispectral scanner on the ground is about 5m × 5m even at 2000m high altitude, and lower height will give higher resolution. The coral reef had already got recovered from bleaching almost perfectly when the observation was made. The sandy bottom between reefs, whose origin considered is coral reef, showed very similar characteristics in reflectivity to that of the perfectly bleached coral reefs in the north-western coast of Ryukyu main island, therefore, we extracted many image elements which are a mixture of coral reef and sandy bottom in a variety of ratio and adopted the ratio of sandy bottom as that of bleached reef to correlate with reflective intensity. After all this correlation yielded a good linear relationship in three visible bands, resulting in a conclusion that visible band observation from aircraft at 2000m or lower altitudes enables us to monitor coral reef bleaching.

Key Words : coral reef, bleaching, Okinawa, aircraft, remote sensing

-
- * 1 海洋観測研究部
 - * 2 海洋変態・環境研究部
 - * 3 (財)熱帯海洋生態研究振興財団
 - * 4 Ocean Research Department
 - * 5 Marine Ecosystems Research Department
 - * 6 Establishment of Tropical Marine Ecological Research

1 はじめに

1998年夏季に世界的な規模で生じたサンゴの白化現象は、大きな社会的関心呼んだ。太平洋、大西洋、インド洋を始めとする多くの海洋に及び、その規模はまさしく世界的であった。わが国近海でもサンゴの生息域は各地に存在するが、特に南西諸島を中心とする海域において生じた白化が深刻であった。しかも、白化の進行の程度や速度は場所により異なり、進行する場合だけでなく回復する場合もあって、変化は多様である。そのため、サンゴの白化の程度を全サンゴ礁域にわたり、常時監視することが必要であり、そのための迅速な調査法を確立することが必要である。この目的でこれまでに衛星によるリモートセンシングの試みが数多くなされたが、地表解像度が低いことや大気効果の影響が大きいことなど、サンゴ礁の観測にはまだ多くの解決すべき課題がある。

人工衛星リモートセンシングに代わる方法としては航空機によるリモートセンシングが考えられるが、これもやはりまだ十分には技術的検討が行われているわけではない。そこで本研究は、地表解像度や、白化度に対するサンゴ礁の反射光強度の依存性などの点から航空機リモートセンシングがサンゴの白化分布調査に応用可能かな否かを明らかにすることを目的として実施したものである。

2 観測及びデータ入手

リモートセンシングにおいては、図1に示すような一連の放射（ここでは可視光）伝達過程の観測が必要である。しかし、今回は図1中の航空機高度における上向放射光のみを観測した。観測は、1999年2月15日および16日の両日、高度2000mにおいて可視域内の3スペクトル帯で実施した。観測時の天候は快晴で、無風であった。主たる観測域は、図2に示す沖縄県慶良間諸島阿嘉島周辺の全サンゴ礁域であるが、同時に海上踏査観測を行ったところ阿嘉島周辺海域におけるサンゴは白化から完全に回復していたため、完全に白化したサンゴ礁との比較を的として図3に示す沖縄本島北西部沿岸域も予備的観測域に選び、観測を実施した。

写真1、2、3及び4は、それぞれ観測に用いた航空機、機内に治具で固定されたマルチスペクトルスキャナー、マルチスペクトルスキャナーの受光部（機外）、およびマルチスペクトルスキャナーの制御部（機内）である。マルチスペクトルスキャナーはJ-SCAN-AT-5M/II型で、検出器はPMT, Si, MCT, 瞬時視野角は2.5mrad, 走査角度は80°で集光系は1面鏡カセグレン方式である。また、スペクトルチャンネル数は全5チャンネルで、0.40~46 μm , 0.53~57 μm , 0.65~0.70 μm , 0.95~1.10 μm , 8.0~14.0 μm である。今回サンゴ礁観測に用いたのは最初の3チャンネルのみで、いずれも可視域である。

海上踏査観測は、2月16日に図2に示す阿嘉島周辺域の10数点において実施した。この観測では、海面の波浪状況、サンゴ礁の分布、海底の状況や種類とその分布、深度、水質などの目視観測とともに、後日の比較のため写真撮影を行った。その結果、この海域ではサンゴは完全に白化から回復しているのが確認された。また、

航空機によるサンゴ礁観測の上で特に不都合な条件は認められなかった。

また、前日の2月15日には、図3に示す沖縄本島南東部の知念沖サンゴ礁の調査も実施したが、この海域のサンゴ礁には完全な白化が認められた。

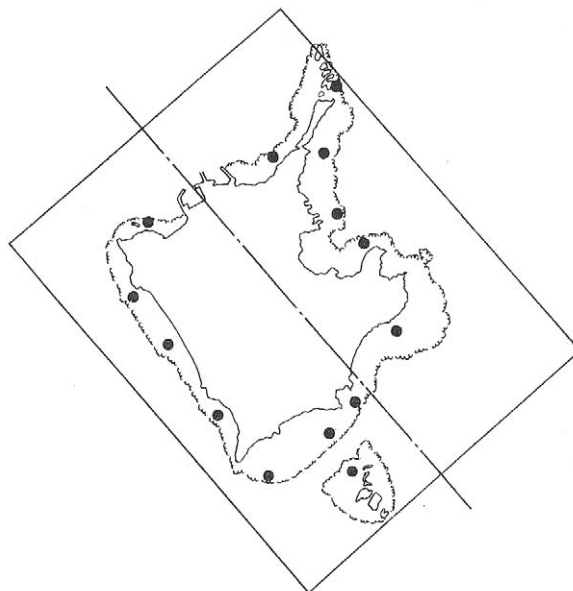


図2 阿嘉島周辺における現地調査地点 (●)

Fig. 2 Sea truth sites around Akajima Isl. (●)

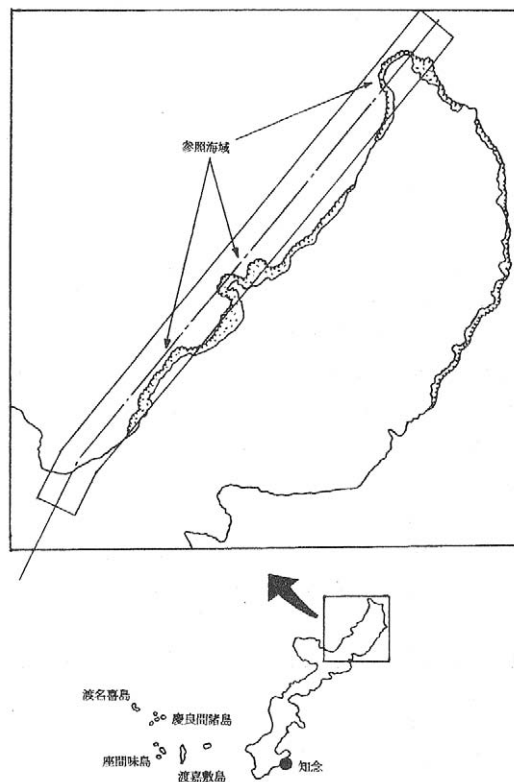


図3 沖縄本島周辺における調査地点

Fig. 3 Sea truth sites around Okinawa Isl.

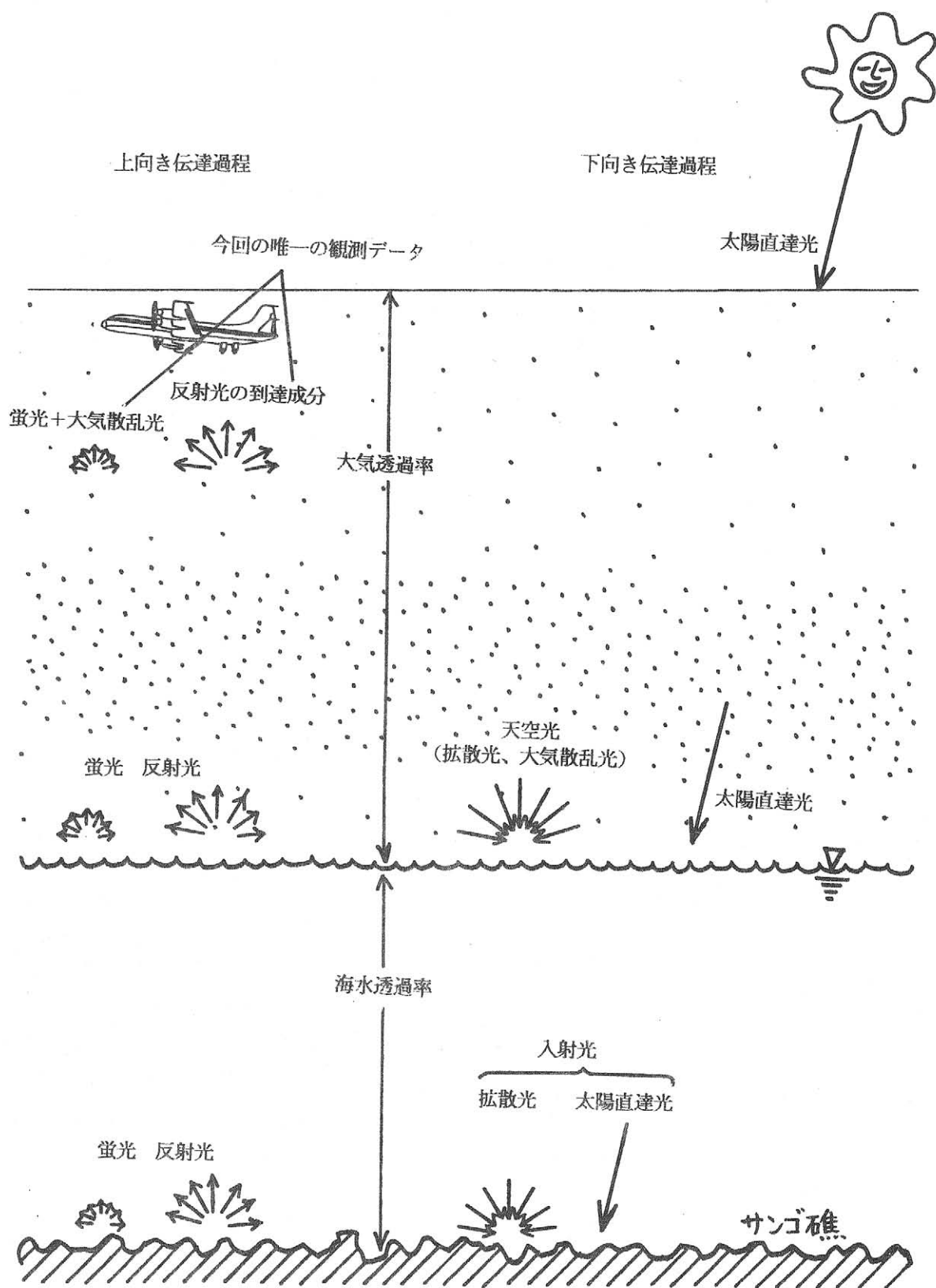


図1 航空機リモートセンシングにおける放射伝達過程
Fig. 1 Radiative transfer process in aircraft remote sensing.



写真1 観測に用いた航空機
Photo. 1 Aircraft employed in observation.

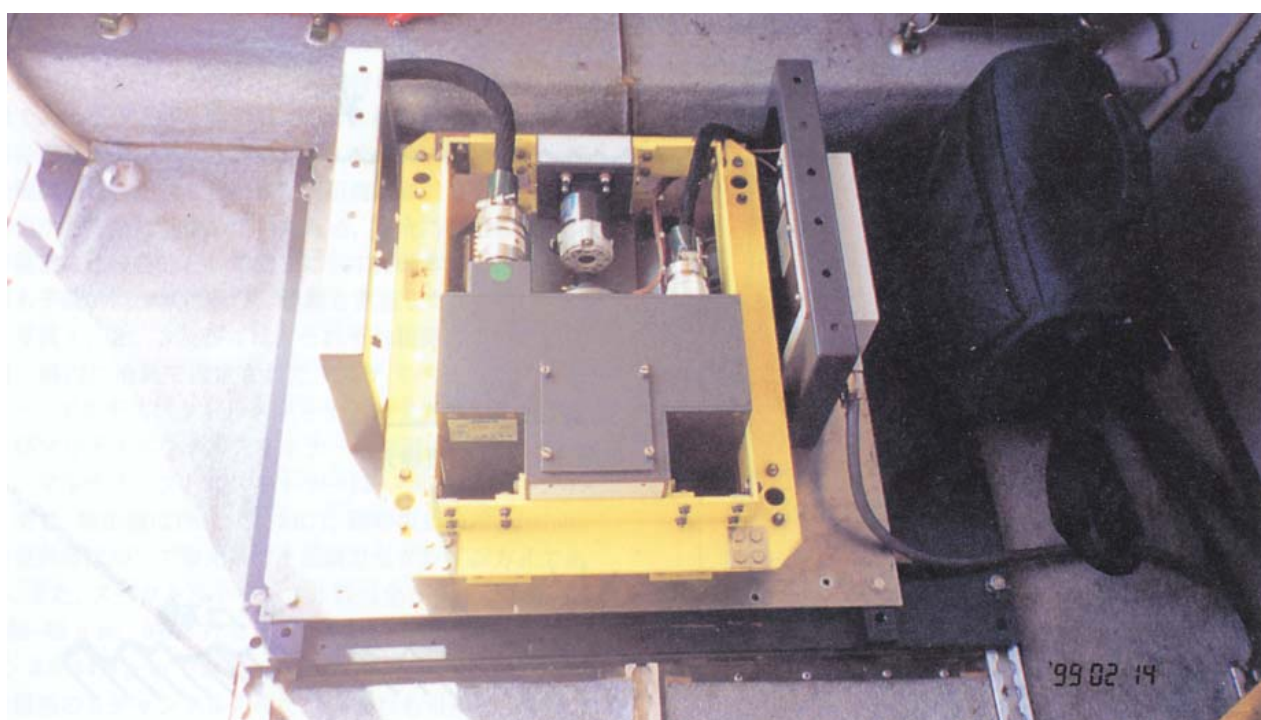


写真2 マルチスペクトルスキャナー用治具
Photo. 2 Jig for multi-spectral scanner

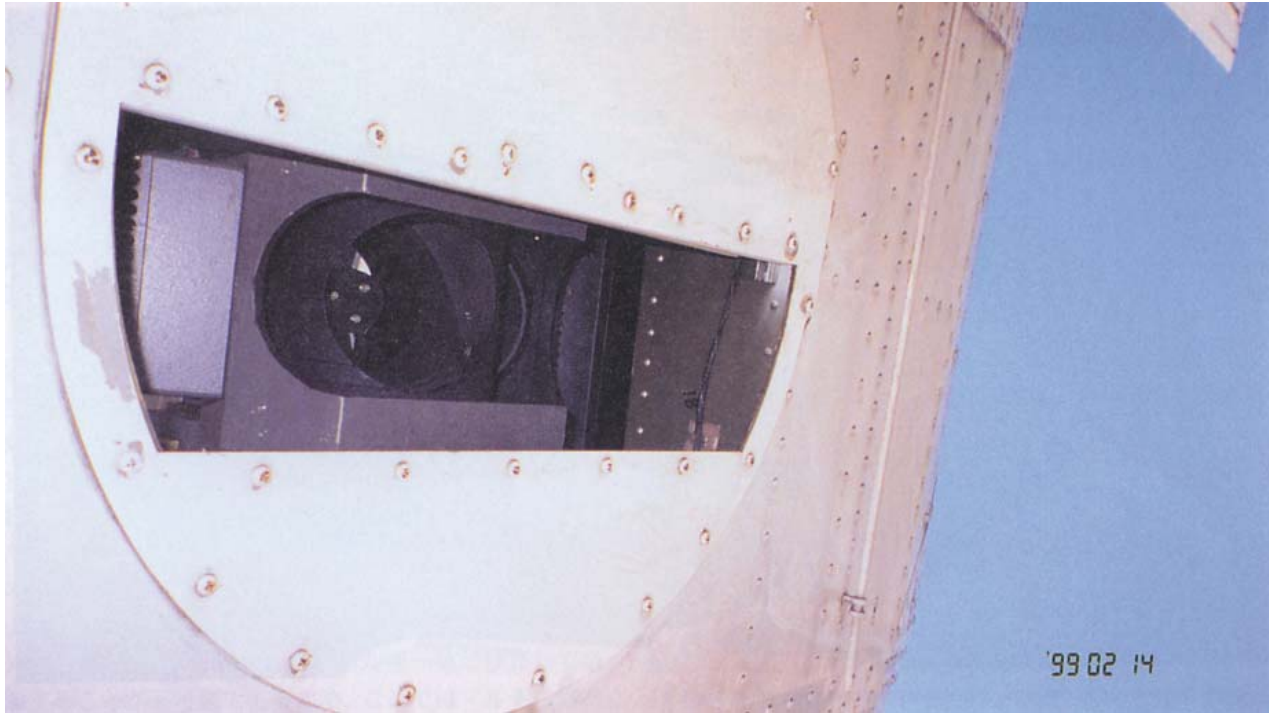


写真3 マルチスペクトルスキャナー受光部
Photo. 3 Multi-spectral scanner window



写真4 マルチスペクトルスキャナー制御部
Photo. 4 Control unit of multi-spectral scanner



写真5 阿嘉島周辺における回復後のサンゴ礁
 Photo. 5 Coral reef which has already recovered from bleaching.

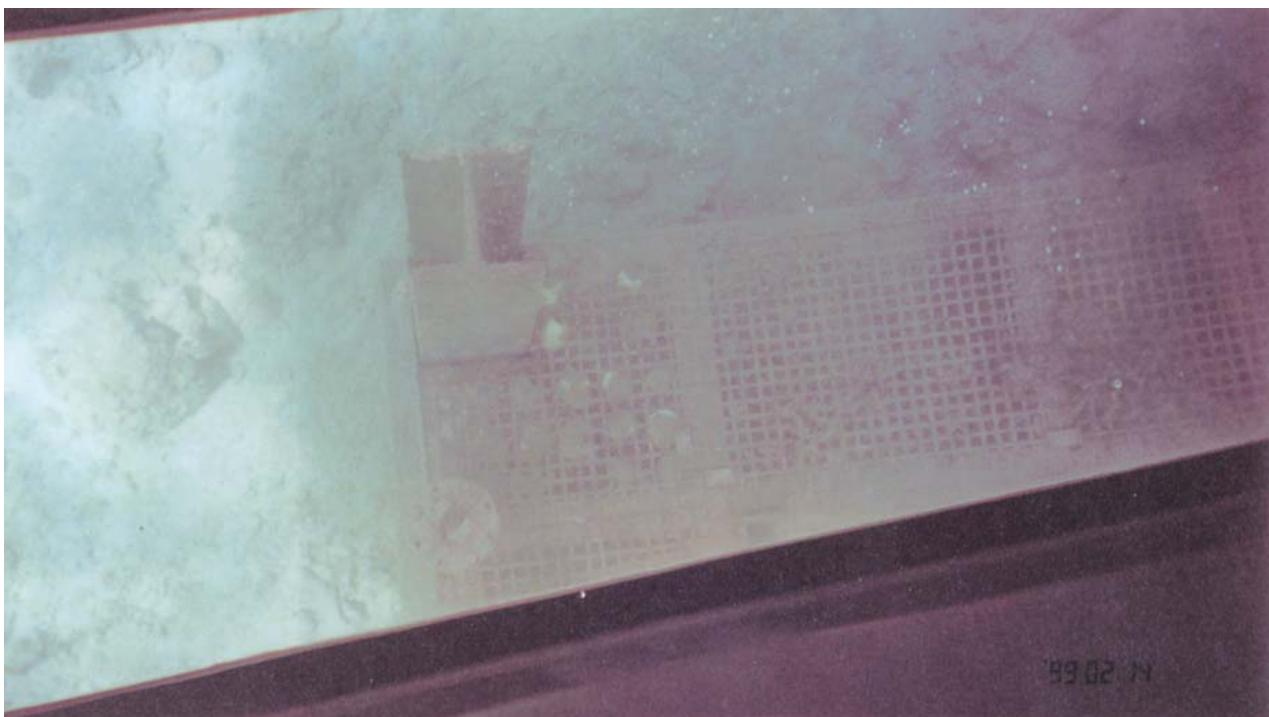


写真6 知念沖の完全に白化したサンゴ礁
 Photo. 6 Coral reef completely bleached off Chinen in Okinawa Isl.

このほか、琉球大学瀬底臨海実験所、沖縄県水産試験場、(財)熱帯海洋研究財団などからもサンゴの白化状況に関するデータや情報を入手した。

なお写真5及び6は、それぞれ阿嘉島周辺海域における白化から完全に回復したサンゴ礁と、知念沖において白化後に完全に死滅したサンゴ礁の様子を示している。

3 解析

3.1 白化度推定法確立のための解析条件

図1は、航空機リモートセンシングによるサンゴ白化分布調査における放射伝達過程を示したものである。航空機が観測するサンゴの反射光を絶対エネルギー値で観測するためには、図1において上向き及び下向きに伝達する放射をすべて観測しなければならない(これを二流放射伝達理論: Two flux (flow) theory と呼ぶ)。しかし、今回の緊急研究においては、これらすべての観測のための準備に制約があり、観測できたのは図1に示すように上向き反射光と蛍光の航空機到達成分、並びに大気散乱光である。したがって、絶対エネルギー値に換算して議論することが不可能であるため、ここではマルチスペクトルスカナーが観測するエネルギーの大きさの相対的尺度であるカウント数を用いて議論することとする。ただし、カウント数から較正により等価な絶対エネルギー値を求めることは可能であるが、ここでは特に重要な意味はない。また、観測を行った2月15、16日の両日も快晴で、その他の気象条件も良好であったほか、航空機観測時刻もほぼ同時刻であったため、ここでは両日の観測データの比較を行う場合正規化は行わない。

また、サンゴは蛍光を発することが知られているが、以下の理由により航空機で観測した上向き光中の蛍光は無視することとする。図4は、地球大気上面に入射する太陽光エネルギー、及び清澄大気を通過して海面に到達する太陽光エネルギーを示している。また図5は、佐々木らが観測した清澄大気のもとでの海面における全下向き光中の拡散光の割合を示したものである。空気中の気体分子による光の散乱はRayleigh散乱として知られ、波長の4乗に反比例する。したがって、全下向き光中で拡散光が占める割合は、波長が短いほど大きくなり、400nm以下の紫外線領域では30~70%に達する。ところで、拡散光が海面を通過する場合、直達光とは違ってその透過率は海水の屈折率の2乗の逆数に比例する。したがって、海面を通過する拡散光の割合は50%である。その上、図6に示すように、紫外線領域における海水の光学的消散係数は可視域よりも大きい。さらに、全蛍光過程におけるサンゴの光学的効率、他の生物における同様の過程から推定してせいぜい1%程度であろうと考えられる。これらのほかに、最も低い反射率を持つ非白化サンゴ(換言すれば、最も高い活性を持つサンゴ)の場合でも反射率がせいぜい10%であることを併せ考えれば、蛍光を無視することは合理的であろう。

同様に、気象条件が良好であったため、ここでは便宜上観測された上向き光中の大気散乱光を無視する。

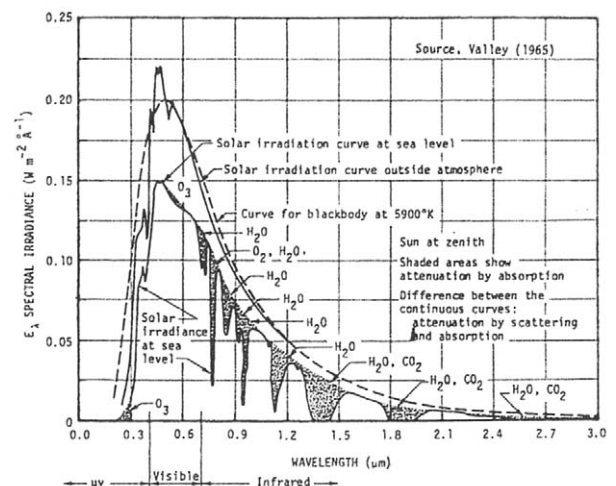


図4 大気上面入射太陽放射エネルギー、および大気通過後に地表に入射する太陽放射エネルギー (R. G. Reeves, A. Anson and D. Landen, Manual of Remote Sensing, Am. Soc. Photogram., 1976)

Fig. 4 Solar energy incident on upper surface of atmosphere and that incident on the ground after passing atmosphere. (R. G. Reeves, A. Anson and D. Landen, Manual of Remote Sensing, Am. Soc. Photogram., 1976)

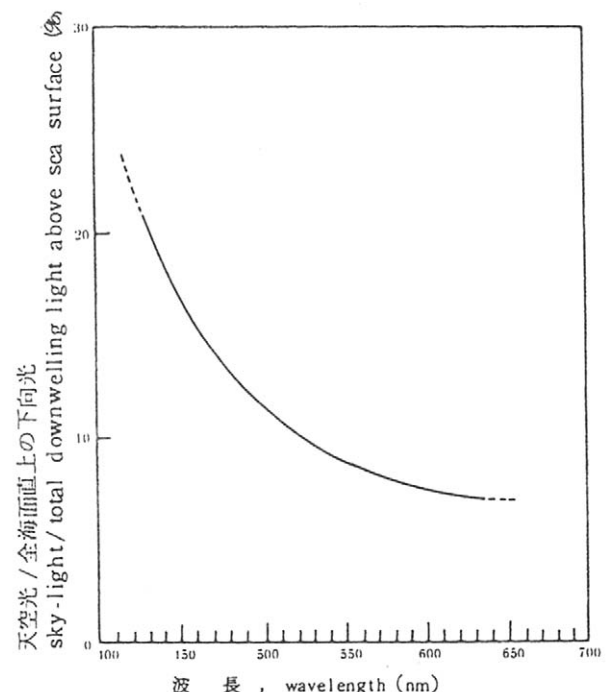


図5 晴天時の全海面入射光中の天空光の割合

Fig. 5 Percentage fraction of sky light in total downwelling radiation.

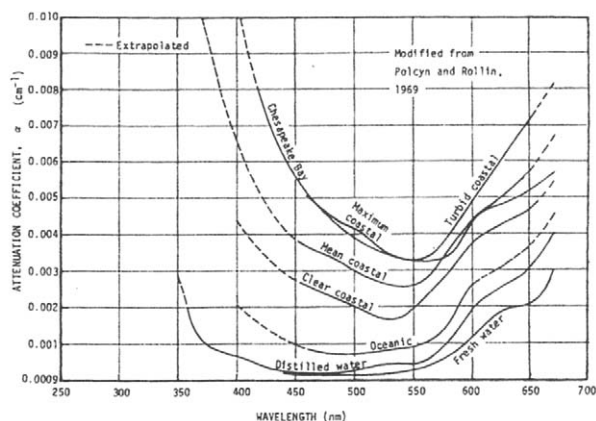


図6 海水と真水の光消散係数 (R. G. Reeves, A. Anson and D. Landen, Manual of Remote Sensing, Am. Soc. Photogram., 1976, pp.119)

Fig. 6 Extinction coefficient of sea and fresh waters. (R. G. Reeves, A. Anson and D. Landen, Manual of Remote Sensing, Am. Soc. Photogram., 1976)

3.2 白化度に対する反射過程の依存性の誘導

今回、阿嘉島周辺海域において10数ヶ所で海上踏査観測を実施した結果、同島周辺海域ではサンゴが白化から完全に回復しており、白化したサンゴは認められなかった。写真5に阿嘉島周辺海域における回復後のサンゴ礁を示す。また、サンゴ以外の苔や藻類等はほとんど認められない。一方、かつて海洋科学技術センターがサンゴ研究を実施した沖縄本島南西部の知念村沖合では、サンゴが完全に白化、死滅し、回復不能の状態が認められた。ここでもやはり苔や藻類等の付着は認められなかった。写真6が完全に白化し、回復不能の状態に陥っている知念沖合のサンゴ礁を示したものである。また、沖縄県内の数機関において調査した結果、沖縄本島北西部沿岸域ではサンゴの白化が依然進行し、いまだに回復していない地域があることがわかった。したがって、航空機観測データから白化度0%の場合の反射光強度は、上述のカウント値として対応付けが可能である。

ところで、阿嘉島周辺のサンゴ礁では、サンゴ礁、砂海底、岩礁が混在するが、そのうち砂海底部の多くはサンゴ起源の砂であると考えられるため、砂海底部の観測カウント値を沖縄本島北西部の完全に白化したサンゴ礁の観測カウント値と比較した結果、水深に1m程度の差はあるもののほとんど等しい値を示した。そこで、阿嘉島周辺海域においては、砂海底とサンゴ礁が混在する海域で砂海底を完全に白化したサンゴ礁とみなした。そして、航空機観測画像から抽出した部分微小画像中で砂海底部が占める割合を白化度と仮定し、その部分微小画像の反射光強度と比較することにより反射光強度の白化度依存性を求めた。

なお、部分微小画像を抽出するにあたっては、水深の違いによる影響を極力抑えるため、海上踏査結果をもとにほぼ等水深地点を選んだ。

4 結果及び検討

4.1 白化度に対する反射過程の依存性

3. 2. のようにして得た各チャンネルごとの仮想白化度に対する反射光強度の依存を示したものが図7である。ここでは、反射光強度は便宜上マルチスペクトルスキャナーのカウントで示してある。(反射光強度をエネルギー値に換算して議論することも可能であるが、ここではこれ以上の議論はしないのでカウント値で議論している。)図7に示すように、3つのチャンネルともサンゴからの反射光強度はサンゴの白化度に対してほぼ直線的な依存性を示しているが、感度はチャンネル2が最も高く、次いでチャンネル1、チャンネル3の順となる。バラツキの大きいものも認められるが、これは反射特性の問題ではなくむしろ微小画像中の仮想白化部比率の誤差であると考えられる。

4.2 白化度推定精度向上法の検討

図7から明らかなように、1チャンネルだけから白化度を推定するとチャンネルによっては大きな誤差を生ずる恐れがある。そこで、以下のような方法で誤差を軽減することを検討した。

図7に示すように、サンゴ白化度と反射光強度との間には直線的関係が見られる。そこで、両者の関係を以下の式で与えることができる。

$$a_1 + b_1 x = c_1 \quad \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$a_2 + b_2 x = c_2 \quad \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

$$a_3 + b_3 x = c_3 \quad \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

ここで、

a_1, a_2, a_3 : 白化度0のときのチャンネル別
反射光強度

b_1, b_2, b_3 : チャンネルごとの白化に対する
反射光強度増加率

c_1, c_2, c_3 : 白化度 x のときの反射光強度の
観測値

x : 白化度

である。これは観測される反射光強度に誤差がない理想的な場合であって、この場合は原理的に①～③式のいずれの式から推定される白化度も同じ値となるはずであるが、実際には誤差を伴う。そこで、①～③式の右辺の反射光を実際の観測値と誤差項で表すと④～⑥式が得られる。

$$a_1 + b_1 x = c_1 + c_1' \quad \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

$$a_2 + b_2 x = c_2 + c_2' \quad \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

$$a_3 + b_3 x = c_3 + c_3' \quad \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

ここで、

c_1', c_2', c_3' : チャンネルごとの反射光強
度における観測誤差

である。

ところが、①～③式は理論式であるからそれらはいずれも等しい x の推定値を与えるが、④～⑥式の右辺は観測誤差を持つため異なる x の推定値を与える。また、①

～③式の組も④～⑥式の組もともに未知数は x のみであるが式は3つずつあり、このようなケースは解析学的には“Overdetermined”と呼ばれるが、これを利用することにより推定値に大きな誤差が生じるのを防ぐことができる。このような場合、④～⑥式を同時に満足する x の値としては、④～⑥式の誤差二乗和を最小にする x の値を求める。そこで、④～⑥式を変形すると⑦～⑨式が得られる。

$$c_1' = a_1 + b_1x - c_1 \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$c_2' = a_2 + b_2x - c_2 \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

$$c_3' = a_3 + b_3x - c_3 \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

そこで、

⑦～⑨式の誤差二乗和 Se とおくと、 Se は⑩式のようになる。

$$Se = (a_1 + b_1x - c_1)^2 + (a_2 + b_2x - c_2)^2 + (a_3 + b_3x - c_3)^2 \quad \dots \quad (10)$$

ところで、⑩式は x に関する2次関数で、しかも下に凸であるから Se に最小値が存在する。そこで、⑩式を x で微分すると以下ようになる。

$$\frac{dSe}{dx} = 2b_1(c_1 - a_1) + 2b_2(c_2 - a_2) + 2b_3(c_3 - a_3)$$

そして、

$$\frac{dSe}{dx} = 0$$

とおくと結局⑪式が得られる。

$$x = \frac{b_1(c_1 - a_1) + b_2(c_2 - a_2) + b_3(c_3 - a_3)}{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2} \quad \dots \quad (11)$$

この x が、3チャンネル同時観測により推定誤差を小さくし、精度を向上させた場合の白化度の推定値で、いずれかのチャンネルにおいてマルチスペクトルスキャナーに特に大きな誤差が生じた場合であっても白化度の推定値に著しい誤差が生じるのを防ぐことができる。実際、この方法により3チャンネルにおいて独立に推定した白化度の誤差が8～15%であってもその中間の誤差に抑えることができた。

5 結論

結局、以上の議論から以下の結論が導かれる。

- (1) 航空機リモートセンシングによりサンゴ礁の白化度を調査することは可能である。
- (2) ただし、沖縄県のサンゴ礁では連続画像的な分布調査は不可能である。理由は、沖縄県周辺ではサンゴ礁は海底や岩礁と入り混じっており、サンゴ礁の大きさが数メートル単位であるため、衛星は無論のこと、航空機によるリモートセンシングであっても、連続画像的調査は困難である。
- (3) 航空機によるリモートセンシングを行う場合、サンゴ礁の平均的大きさが約5m程度であることと、現在のマルチスペクトルスキャナーの地表解像度が高度2000mで約5m×5mであることを併せ考えると、観測高度は2000m以下にとらなければならない。

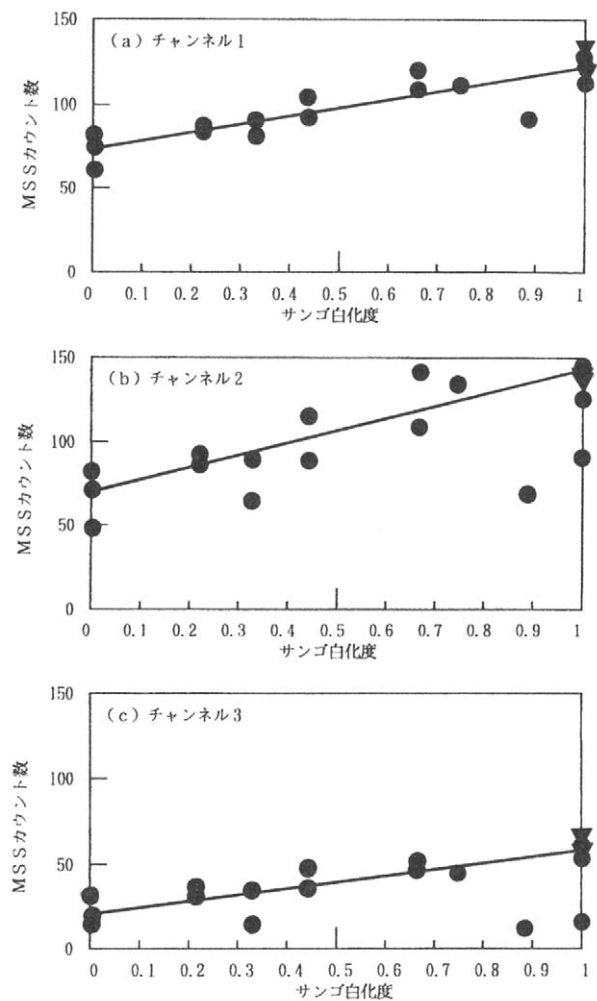


図7 反射光強度の白化度依存性

Fig. 7 Dependence of coral reef reflectivity on degree of bleaching

●: 阿嘉島 Akajima Isl.

▼: 沖縄本島 Okinawa Isl.

- (4) 調査方法としては、予め監視予定海域において5m以上のサンゴ礁を数点、監視対象として選び、観測点としておく。そしてその白化度を定期的に航空機により監視することにより白化度の監視を行う。
- (5) 反射光強度を定量的に観測し、観測精度を高めるためには、図1に示すように上下方向の放射過程を観測することが必要であるが、これが困難な場合には少なくとも航空機レベルで観測される反射光の他に、航空機レベルでの下向き光と気象観測を行う必要がある。気象観測は大気透過率、大気放射、拡散光の割合、海面での反射光の推定などのためである。

6 おわりに

サンゴ礁はわが国でも相当広範囲に分布しているが、「はじめに」で述べたように、その状態を衛星リモートセンシングにより調査、監視するには、地表解像度が低すぎて現段階では困難である。これに代わる方法として航空機リモートセンシングを検討したが、高度やスペクトル帯を適当に選ぶことにより可能であるという結果を得た。しかし、サンゴ礁は10mを超える深度にも存在するし、浅深度での観測であってもさらに精度等の向上を図らなければならない等の問題点が少々存在する。さらに今後の研究に期待したい。

参考文献

- 1) N. G. Jerlov, Optical Oceanography, Elsevier Oceanography Series, Elsevier, 1968, pp.114-133.
- 2) J. Lintz, Jr. and D. S. Simonnet, Remote Sensing of Environment, Addison-Wesley, 1976, pp.36.
- 3) R. G. Reeves, A. Anson and D. Landen, Manual of Remote Sensing, Am. Soc. Photogram., 1976, pp.119.
- 4) 佐々木保徳, 宗山敬, 海水の光学的特性に関する研究(第6報) — 反射率に及ぼす波, 雲量および太陽高度の影響に関する定量的考察 —, 海洋科学技術センター試験研究報告 No.6, 1981, pp.91-100.

(原稿受理: 1999年8月2日)