

3⁻²

サンゴ礁のリモートセンシング

灘岡和夫・Enrico C. Paringit・山野博哉

1 はじめに

衛星や航空機を用いたリモートセンシング技術は、一度に広範囲の現象が観測できることや、分光計測（波長帯ごとの計測）が可能なこと、衛星においては定期的な観測が可能であること、アクセスの不便なところのデータが得られることなどから、サンゴ礁をはじめとする生態系のモニタリングに非常に有効な手段である。

サンゴ礁の基本的な構成要素は造礁サンゴ（以下サンゴ）、藻類、砂地である。白化やオニヒトデの食害を受けて斃死したサンゴは、その後藻類に覆われる。したがって、リモートセンシングによるサンゴ、藻類、砂地をはじめとするサンゴ礁の海底被覆分類によって、サンゴ礁の基本的な構成要素の分布状況の把握に加え、サンゴ礁の健全度評価が広域において可能となる。

しかし、衛星や航空機を用いたサンゴ礁のリモートセンシングには以下に述べる制約がある。まず第一に、海域リモートセンシングに共通する制約として、海水中では近赤外から赤外域の波長帯の光が吸収されてしまうため、海上からでは可視域の光の情報しか使うことができない。この点は近赤外域の光の情報が大きく活用されている陸域の植生のリモートセンシングと比べると決定的に異なる。第二に、褐虫藻が共生しているため、サンゴが海草や大型藻類と似た反射スペクトルを示すことが挙げられる（図1）。これは波長分解能が数10nmのマルチスペクトルセンサでは両者の区別が困難であることを意味する。従来型の衛星はマルチスペクトルセンサを搭載しているため、サンゴ礁の生物分布を正確に把握するには不十分である。第三に、サンゴ礁が空間的に複雑な構造を持っていることが挙げられる。空間分解能の悪いセンサでは、1画素内で混合が起こってスペクトル情報が混ざってしまい、誤分類の原因となる。

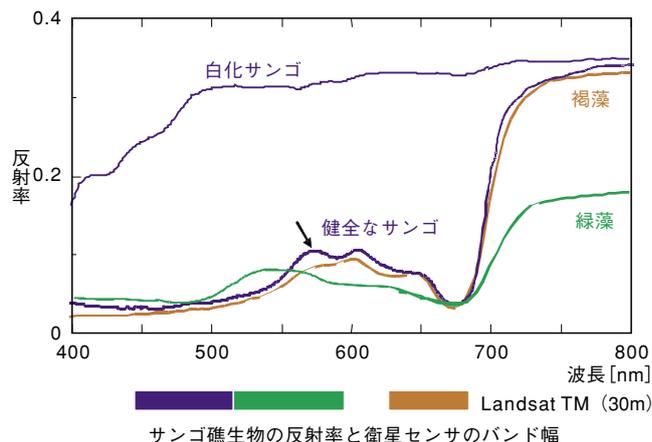


図1 サンゴと藻類の反射スペクトルと衛星搭載のマルチスペクトルセンサ（Landsat TM）の観測バンド。サンゴに特徴的なピーク位置を矢印で示す。マルチスペクトルセンサではスペクトル情報が少なくなってしまい、サンゴに特有なピークを識別することが困難であることがわかる。

しかしながら、過去から20年以上にもわたって広範囲のデータを提供するのはリモートセンシングデータ以外に、以上のような制約はあるもののその解析によってサンゴ礁の変化が明らかにされてきたのも事実である。さらに、最近では技術の進展に伴い、波長分解能が数 nm から10nm に向上了されたハイパースペクトルセンサを搭載した衛星や航空機の運用、高空間分解能センサを搭載した衛星の運用が行われているほか、水中で使用できる防水型のセンサも実用化されている。こうした新しいリモートセンシング技術を含めて、リモートセンシングのさまざまな活用法とその限界を明らかにすることが重要な課題となる。

わが国は宇宙技術の水準が高く、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が中心となって衛星や衛星搭載センサの開発を行ってきた。1978年以降、MOS 1、MOS 1 b、JERS-1、ADEOS、ADEOS II などの衛星の打ち上げが成功し、陸域・水域や大気の詳細なデータが取得されている。

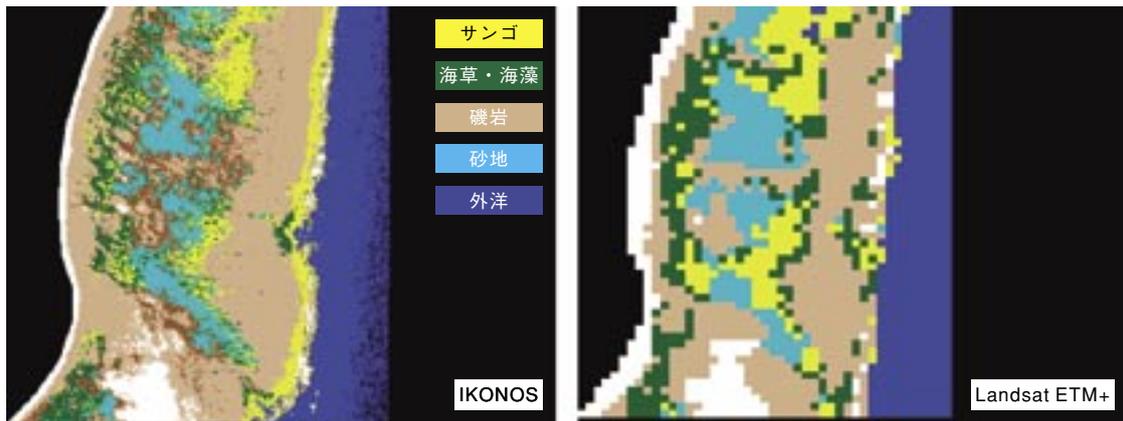


図2 石垣島・白保サンゴ礁を対象とした Ikonos と Landsat ETM+ による海底被覆分類結果の比較

これらのデータは(財)リモート・センシング技術センター (RESTEC) を通じて配布されている。また、(財)資源・環境観測解析センター (ERSDAC) においては Terra 衛星に搭載された国産のセンサである ASTER のデータの解析や配布が行われている。

衛星や航空機を用いたリモートセンシングの対象としては、サンゴ礁の海底被覆分類や健全度評価だけでなく、サンゴの形態的な特徴量の抽出や、水深マッピング、赤土堆積状況の検出、隣接する陸域からの赤土流出の定量的評価、海草藻場のマッピング、などがある。さらには、水温や波浪など、サンゴ礁を取りまく物理環境のリモートセンシングも活発に行われている。

また、短波海洋レーダ (HF レーダ) による広域的な海洋表層流速分布を計測する試みも盛んに行われており、そのような衛星・航空機以外によるモニタリングも広義のリモートセンシングに含まれる。さらに、最近では GPS 搭載型小型漂流ブイによるサンゴ幼生の広域分散挙動のモニタリングなども試みられている。

以下において、リモートセンシング技術を用いた、サンゴ礁に関わるこれらのモニタリングに関して、日本での研究例を中心に述べる。

2 サンゴ礁の海底被覆分類

琉球列島においては、空中写真による被覆分類が1970年代後半から行われている (大葉・有賀 1978)。これらの研究の多くは、画像処理ではなく肉眼による判読に基

づいているが、水深補正を行って被覆分類を行った研究例 (中森・菅井 1990) や、空中写真をスキャナによってデジタルデータ化し、RGB 値から分類を行った研究例 (藤原ら 1997) がある。また、長谷川ら (1999) が、石垣島白保においてカイトに係留したカメラによって、白化したハマサンゴ (*Porites*) の撮影に成功している。

衛星画像としては Landsat TM、Landsat ETM+ や SPOT が主に用いられてきた (加藤ら 1992; 長谷川 1993; Miyazaki *et al.* 1995; 灘岡ら 1997) が、最近では、高解像度衛星 Ikonos による画像データを使った分類が行われ、石垣島白保における、サンゴ、海草類および藻類、砂地、礁岩の4つのクラス分類に関して、Landsat ETM+ を用いた場合の分類精度が64%であるのに対し、Ikonos による分類精度は81%であり、分類精度が向上することが示されている (Andréfouët *et al.* 2003) (図2)。また、石垣島東岸においては最近打ち上がった衛星型ハイパースペクトルセンサ EO-1 Hyperion による分類も試みられている (松永ら 2003)。

通常海底被覆分類では画像ピクセル (画素) ごとの分類を行っているが、実際には、ピクセル内で複数の海底被覆要素が混在している。Paringit and Nadaoka (2004) は、このような状況を対象として、spectral unmixing と呼ばれる手法を導入することにより、ピクセル内での各海底被覆要素の存在割合を算出している。また、彼らは同時に、いわゆるコンテクスチュアル分類 (対象画素の周りの状況を考慮して分類に反映する手法) の考え方を導入し、当該サンゴ礁内における対象画素の位置に応じて分類要素を制限することによって分類精度

を向上させることも試みている。

最近、ハイパースペクトル測定によって、反射率のピークの位置から、サンゴと藻類の識別が可能であることが明らかになっている (Holden and LeDrew 1999; Mumby *et al.* 2001; Hochberg *et al.* 2003など)。放射伝達シミュレーションによって、こうした識別手法は少なくとも水深 3 m まで有効であることが示されており (Yamano *et al.* 2002)、航空機ハイパースペクトルセンサに対する期待が高まっている。日本においては航空機搭載型のハイパースペクトルセンサでは主に *casi* が用いられ、沖縄県黒島と阿嘉島において分類がなされている (Miyazaki *et al.* 1997, 1998; 山野ら 2003)。

3 サンゴの健全度評価

サンゴに共生している褐虫藻はストレスによって変性し、ストレスを受けたサンゴ体内には、縮んだり色素を失ったりした褐虫藻が観察される。この変性が反射スペクトルに影響を与えるのであれば、ストレスを受けたサンゴを検出することが可能となるはずである。Yamano *et al.* (2003b) は、健全なサンゴに水槽内で人為的に高水温ストレスを与え、反射スペクトル (分光反射率) ならびに褐虫藻の状態、光合成の能力の時間的な変化を測定している。その結果、ストレスを与えられて変性した褐虫藻の割合が増加するとともに光合成能が低下し、さらに赤から近赤外域の波長帯において反射スペクトルの形状に変化が現れること (具体的には red edge と呼ばれる分光反射率の一次微係数が極大値を示す波長域が短波長側にシフトすること) を示した (図 3)。この成果は、ストレス下にあるサンゴの検出に反射スペクトル情報を有効に活用できる可能性が高いことを実証するものである。

また、白化したサンゴは反射率が大きく上昇するため、リモートセンシングによる白化サンゴの検出が可能であることが期待される (Andréfouët *et al.* 2002)。後述のように、多時期の Landsat TM 画像を用いて石垣島で 1998 年の大規模な白化現象が検出されている (Yamano and Tamura 2004)。さらに、Ikonos 画像を用いてグレートバリアリーフにおいても白化現象の検出がなされている (Elvidge *et al.* 2004)。

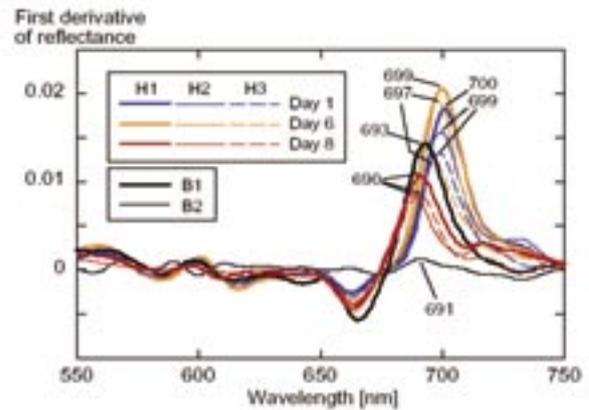


図 3 ストレスを与えた場合のサンゴ (*Montipora digitata*) の反射スペクトルの一次微分の変化 (Yamano *et al.* 2003b)。矢印が red edge の位置を示す。ストレスが続くにつれて red edge の位置が短波長側にシフトする。

4 光学的サンゴキャノピーモデルによるサンゴの形態的特徴量の抽出

沿岸浅海域を対象とする場合、砂浜域を別にすれば、一般に、海底が単純な平面で構成されておらず、サンゴキャノピーや藻場キャノピーといった水深の数割にもなる有限の厚さを持った 3 次元的なキャノピー層が存在することが光学モデル開発の上で重要なポイントとなる。しかし、既存のアルゴリズム (特定の目的を達成するための計算手順) は、総じて、単純な反射面としての「海底面」を想定した通常の面的な「反射率」概念に基づいたものとなっているという基本的な問題点を有している。

サンゴは 3 次元的に複雑な形状をしているため、太陽角度によって陰の現れ方が異なり、さらに太陽入射角と観測方向によって反射率が異なるという双方向反射関数 (BRDF) 特性を持つ (Joyce and Phinn 2002)。Paringit and Nadaoka (2002a, b) や Paringit・灘岡 (2002) はこの特性をモデル化し、光学的サンゴキャノピーモデル (BRDF モデル) を開発した。図 4 はこのモデルをコアとしたサンゴ礁を対象とした光学モデルの基本フレームを示したものである。同図に示すように、全体の光学モデルは、上記のサンゴキャノピーモデル (図中、3-D Coral Model) の他に、大気効果を取り込むための Atmospheric Model、水深の違いや水中の濁度やクロロフィル等の光学的特性量の効果を取り込むための Water Column Model (Paringit and Nadaoka 2002c)、そして海

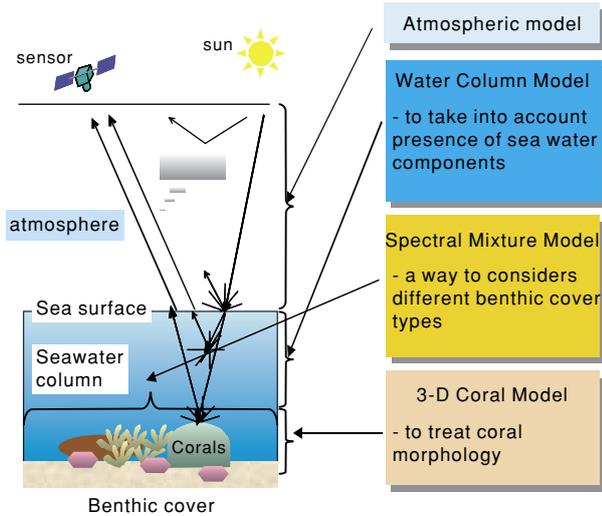


図4 サンゴ礁光学モデル基本フレームの概念図

底被覆要素がサンゴ以外に砂や海藻などさまざまな要素からなっていることを表現するための Spectral Mixture Model からなる。図5は、この光学モデルを石垣島・白保リーフ海域の Ikonos 画像に適用することによって得られたサンゴ被度と Facet Area Index (陸上植生キャノピーの LAI: 葉面積指数に対応する量) に関するある岸沖測線上の値を、サンゴ被度に関する現地データとともに示したものである。

5 水深マッピング

サンゴ礁生態系は、干潟や藻場などとともにきわめて浅い水域に成立している沿岸生態系であるが、このような極浅水域における水深情報は第一義的な重要性を持つ。例えば、サンゴ礁域における流れはサンゴ礁の凹凸地形に強く支配されており、水温特性も水深の違いによって大きく左右される。しながら、このような海域では水深が極めて浅いがゆえに船舶による深浅測量が困難で、通常の見図には極めて限られた情報しか記載されていない。これに対し、リモートセンシングによれば、このような浅海域を含めた広域情報を容易に取得できることから、リモートセンシング画像情報から水深情報を合理的に抽出することができるアルゴリズムの開発に成功すれば、その効果は計り知れない。

リモートセンシングによるマッピングが可能な水深範囲は、海水中での光の消散減衰により、清澄な海水の場

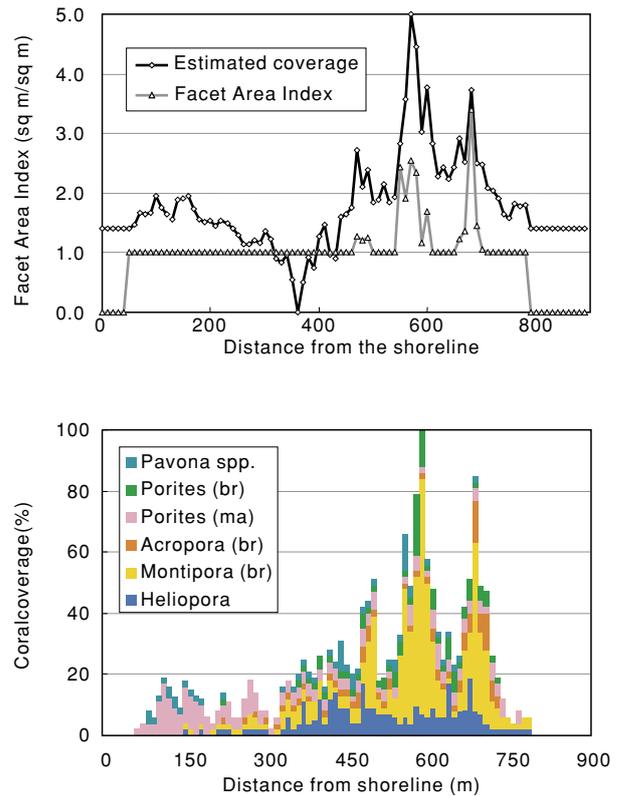


図5 (a) 石垣島サンゴ礁の Ikonos 画像 (2001年3月撮影) にサンゴキャノピー層モデルを適用することによって算出されたサンゴ被度と Facet Area Index、(b) サンゴ被度に関する2001年の現地データ (Kayanne *et al.* 2002より改変)

合でも25m程度までに限られる。海水が濁っている場合には、当然ながら、かなり浅い海域しか水深マッピングできなくなる。

水深マッピングに関する初期の研究は、経験的な回帰関係式をベースにしている。この方法は、簡便でデータ処理が早いという利点があるけれども、回帰関係式のパラメータを決定するために水深に関するいくつかの現地データを必要とするうえ、海水濁度などの海水の光学的特性に関する諸量の影響を合理的に取り扱うことができないという問題を有している。例えば、Benny and Dawson (1983) や Lyzenga (1978)、Jupp (1988) の手法は、原理的に水中での光の散乱減衰係数に大きく依存したものになっているにもかかわらず、解析対象海域の水質が一樣と仮定している。また、海底面についても、アルベドが一定の完全拡散面 (ランバート面) と仮定している。

前節の議論から明らかなように、実際のサンゴ礁の海底面はさまざまな海底被覆要素からなっていて決して空間的に一樣ではなく、しかも、明確な双方向反射特性

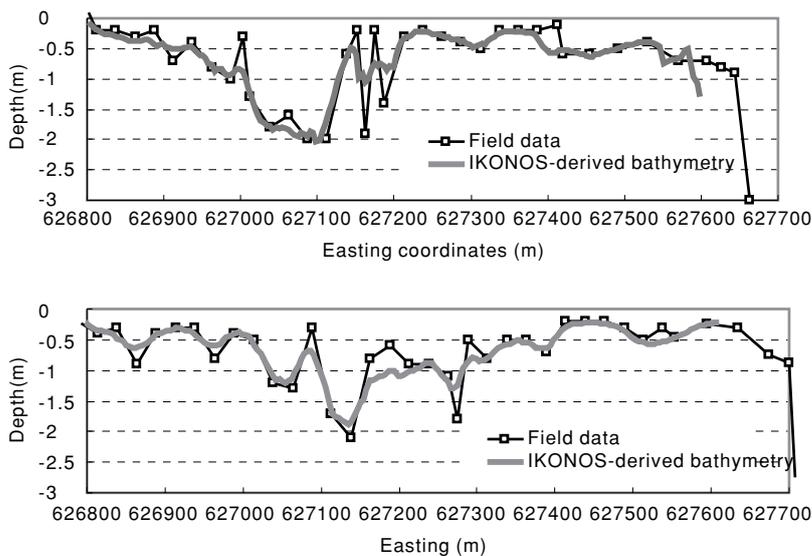


図6 石垣・白保リーフ海域に関する Ikonos 画像に Paringit and Nadaoka (2002c) の手法を適用した場合の水深推定結果と現地データ (Kayanne *et al.* 2002) との比較

を有する有限な層厚を持ったキャノピー層であって、上記のような単純な海底面の仮定の非現実性は明らかである。逆にいうと、よりマッピング精度が高く、しかも一般性・汎用性を兼ね備えた手法を開発していくには、このような現実のサンゴ礁海底面の特性を合理的に反映させることができ、しかも海水の光学的特性の効果も明示的に組み込むことが可能な水深マッピング手法の開発が必要、ということになる。このような目的から、Paringit・灘岡和夫 (2002) および Paringit (2003) は、前節で示したサンゴ・キャノピー光学モデルをベースとして、そこに、新たに水深を未知変数に加えることにより、同様の非線形最小化アルゴリズムを適用することによって水深を衛星画像から逆推定する手法を開発している。

図6は、この手法を石垣島東岸の白保リーフ海域を対象とした Ikonos 画像に適用した結果の例を示したもので、Kayanne *et al.* (2002) によって水深データがすでに得られている同海域中の2つの岸沖方向測線上での水深分布に関して、推定値と現地データを比較したものである。これから、かなり良好な水深マッピング結果が得られていることが分かる。また同時に、4 m という高分解能の Ikonos 衛星画像を用いることで、サンゴ礁内の微細な海底地形の特徴を再現できていることも確認できる。通常の分解能の Landsat TM を用いた場合においても、この手法による水深推定結果は、既存のいくつかの手法に比べてかなり良好な結果を与えることが

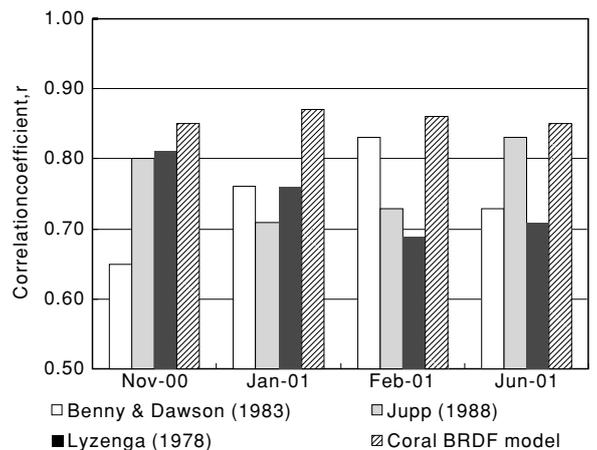


図7 石垣・白保リーフ海域に関する Landsat TM 画像に対する、Paringit and Nadaoka (2002c) の手法 (Coral BRDF Model) と既存手法による水深推定結果の比較図 (Paringit 2003から改変)

確かめられている。図7は、異なる4時点での石垣・白保リーフ海域の Landsat TM 画像に対して、本手法 (図中、Coral BRDF Model と表記) と既存の手法 (Lyzenga (1978)、Benny and Dawson (1983)、Jupp (1988)) による推定結果の現地データとの相関係数を算定して比較したものである。これから、明らかに本手法が、より精度の高い結果を与えていることが分かる。

田村ら (2003) は、この Paringit・灘岡和夫 (2002) および Paringit (2003) による水深マッピング・アルゴリズムを石垣島東岸リーフ海域の Ikonos 画像に適用して得られた高解像度水深データに基づいて、独自に開発した浅海流動モデルによる数値シミュレーションを実施し、流速や水位変動などに関して、現地データときわめて良好に一致する結果を得ている。

6 リーフ海域における赤土堆積状況の検出

隣接する陸域から流出した赤土 (表層土壌) のリーフ海域への流入・堆積は、琉球列島におけるサンゴへの典型的な環境ストレスのひとつである。リモートセンシングは、それによってリーフ海域における赤土の堆積状況の面的な把握が可能になるだけでなく、発生源である隣接流域での土地利用や植生被覆状況のモニタリングにも威力を発揮し得ることから、赤土流出・堆積モニタリン

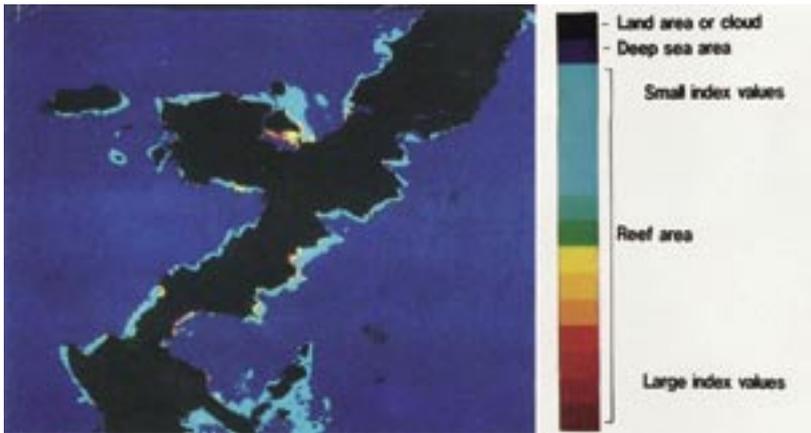


図8 沖縄島中北部のLandsat TM画像による赤土堆積指標SIの値の算出結果（灘岡・田村2002）

グツールとして極めて高い応用可能性を秘めている。

リーフ海域における赤土堆積分布の検出手法の一つとして、灘岡・田村（1992）は、光学理論に基づいた簡便な赤土堆積指標（ここではSI: Sedimentation Indexと呼ぶ）を導出し、沖縄本島中北部沿岸のリーフ海域に関するLandsat TM画像に適用することにより、現地調査結果と良好に一致する結果を与えている（図8）。また、陸域での赤土発生やリーフでの赤土堆積に影響すると考えられるいくつかの要因（降雨強度、地形傾斜、土壌条件、植生被覆状態、リーフ幅）のうち、リーフ海域への赤土流出・堆積には、植生被覆の違いが最も強く影響を与えていることが数量化理論第2類による解析結果から示されている。

この赤土堆積指標SIは、赤土堆積に伴って海底の色合い、すなわち分光反射特性が変化することに着目して、その変化の度合いを、衛星データから、水深の違いなどの影響を合理的に排除する形で抽出しようとするものである。しかしながら、一口に赤土といっても様々な種類のものが存在し、それぞれがかなり相異なった色合いを有しているため、この色合いに着目した方法では、さまざまな種類の赤土を含む広域的な赤土堆積マッピングを行うには限界がある。

そこで灘岡・田村（1993）は、海底での赤土の反射特性よりも海水中での赤土の濁りによる光の透過特性の方が色に対する依存性が少ないこと、ならびに、海底に赤土が堆積している海域ほど海水の濁りが大きいという観測事実（沖縄県環境保健部1989）に着目して、海水の濁りを表す光の水中消散係数を理論的に算定することを試みている。具体的には、潮位が異なる近接する二時期

の画像データを利用して、水中消散係数の違いにより、同じ潮位差でも画像上の値が異なることに着目し、そのことを理論的に評価することでアルゴリズム開発を行っている。また、灘岡（1995）は、リーフ海域に堆積している赤土の分光反射特性を、近接する陸域の裸地についてのリモートセンシング画像解析結果から抽出することにより、その情報に基づいて「赤土による海底面の被覆率」を算出するアルゴリズムを開発し、沖縄本島沿岸リーフ海域に適用している。その結果、赤土の種類が大きく異なる海域を含む広域的なLandsat TM画像解析の場合でも、問題なく赤土堆積情報を抽出できることが示されている。

さらに最近のアプローチとして、Paringit and Nadaoka（2003c, 2004）は、spectral mixtureモデルに基づいて、リーフ海域における赤土堆積状況を検出するアルゴリズムを開発している。この方法は、各画像ピクセルにおいて、赤土による海底被覆率が、他のさまざまな海底被覆要素による被覆率とともに画像分類の一環として得られるというところに特徴がある（「サンゴ礁の海底被覆分類」の節参照）。したがって、上記の赤土堆積指標SIなどの算定アルゴリズムでは、赤土以外の海底被覆要素に顕著な空間的非一様性がないことを前提としているのに対し、この手法では、赤土だけでなく他のさまざまな海底被覆要素の任意の割合での組み合わせを前提とした、より一般的な状況を対象とし得る。図9は、この手法を異なる4時点での石垣白保リーフ海域のLandsat TM画像に適用し、赤土海底被覆率を算出した結果を示したものである。このうち2001年6月の画像の解析結果を見ると、轟川河口南側海域に顕著な赤土堆積が現れている

図9 異なる4時点での石垣白保リーフ海域の Landsat TM 画像に基づく spectral mixture モデルによる赤土海底被覆率の解析結果 (Paringit and Nadaoka 2003c)

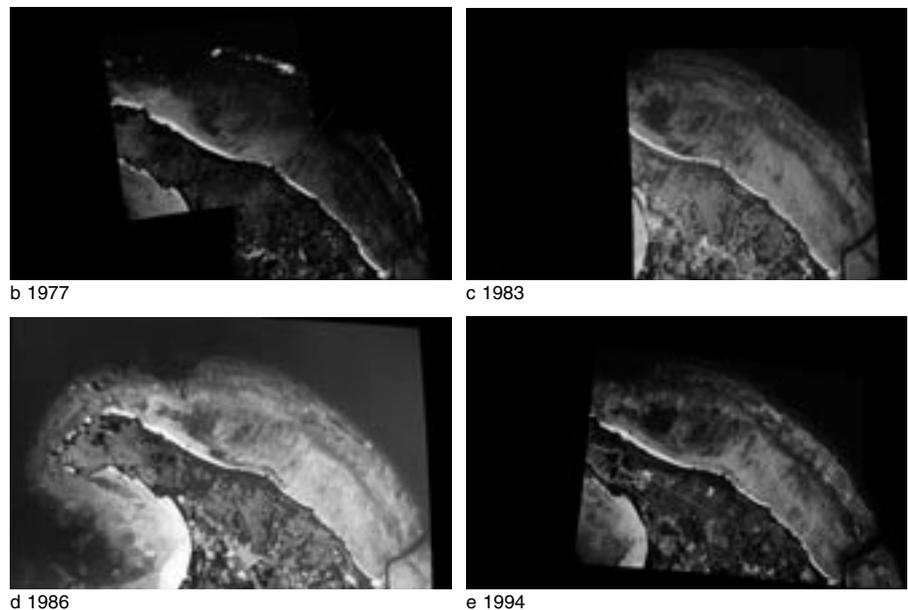
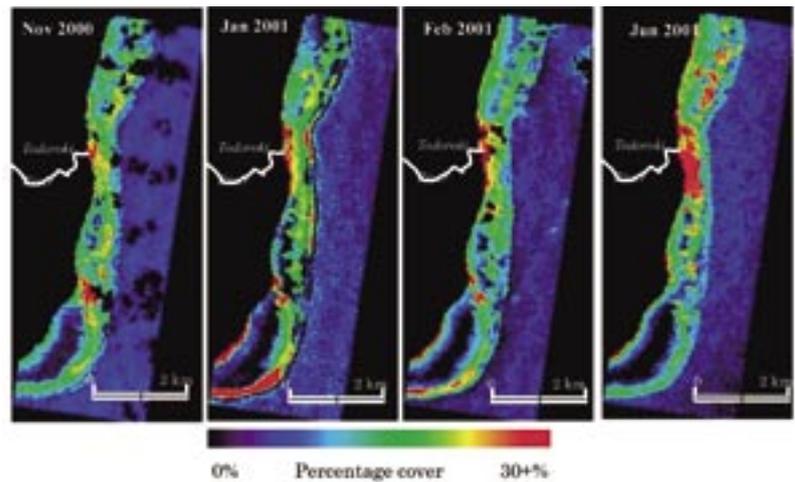


図10 空中写真で見た石垣島川平サンゴ礁におけるサンゴパッチの変化 (Yamano *et al.* 2000)

ことがわかる。これは、この直前の2001年5月31日に轟川で異常な出水があり、その直後にたまたま発生した強い北風による南向きの吹送流によって、轟川の出水に伴う赤土が大量に河口南側海域に運ばれ堆積したことによるものと考えられる (灘岡・Paringit 2002)。

7 サンゴ礁の長期的変化のモニタリング

多時期の空中写真や衛星データを解析することによって、サンゴ礁の変化を検出する研究がなされている。長谷川 (1993, 1998) と Matsunaga and Kayanne (1997) は、Landsat TM と空中写真を用いて、目視によってそれぞれ石垣島白保と川平において海藻帯やサンゴパッチの変

化を明らかにした。後に、Yamano *et al.* (2000) は1973年から1994年までの5時期の空中写真の解析と気象データにより、川平におけるサンゴパッチの変化 (図10) が台風によるものである可能性を指摘した。

広域におけるサンゴ礁の変化のモニタリングは衛星リモートセンシングによってなされている。Matsunaga *et al.* (2000) は、Landsat TM 画像データを用いて Lyzenga (1978) に基づいて水深補正を行い、1984年から1996年までの石垣島周辺のサンゴ礁の変化を解析している (図11)。その結果、季節による変化があること、白保、川平、明石での年変化が大きいことを指摘している。

1998年夏に、琉球列島全体で高水温が原因と考えられる大規模な白化現象が起り、白化現象を検出する試みがなされている。Yamano and Tamura (2004) は、放射

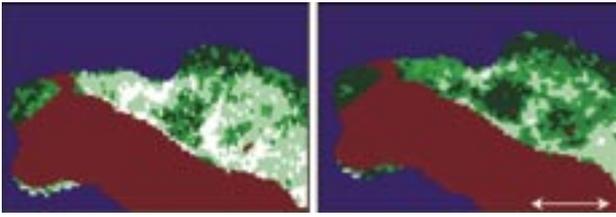


図11 Landsat TMにより明らかになった石垣島川平におけるサンゴ礁の変化（松永恒雄博士より提供）

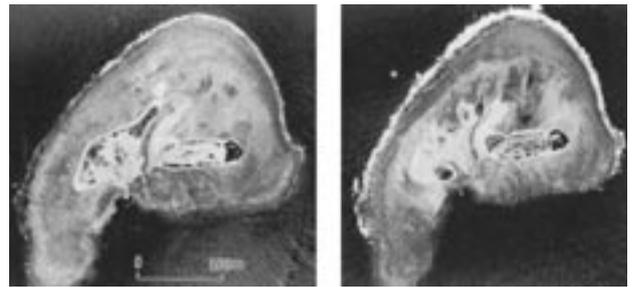


図12 空中写真で見たサンゴ州島（チービシ、神山島）の変化（左：1970年5月、右：1984年9月）（長谷川 1990b）

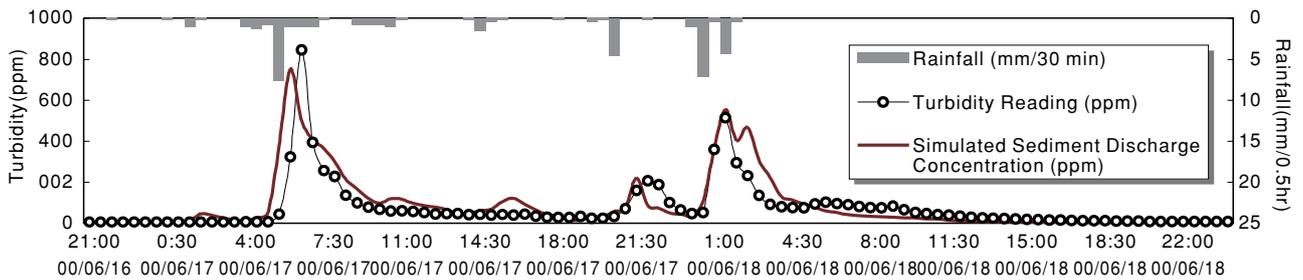


図13 石垣島轟川下流部での出水時赤土濃度の時系列についてのモデル計算結果と現地データの比較

伝達計算によって、白化していない時期の画像と白化した時期の画像を比較することにより、23%以上の白化が Landsat TM で検出できると結論した。さらに、彼らは1984年から2000年までの Landsat TM を用いて、石垣島周辺海域において白化率25%以上の白化現象を検出した。

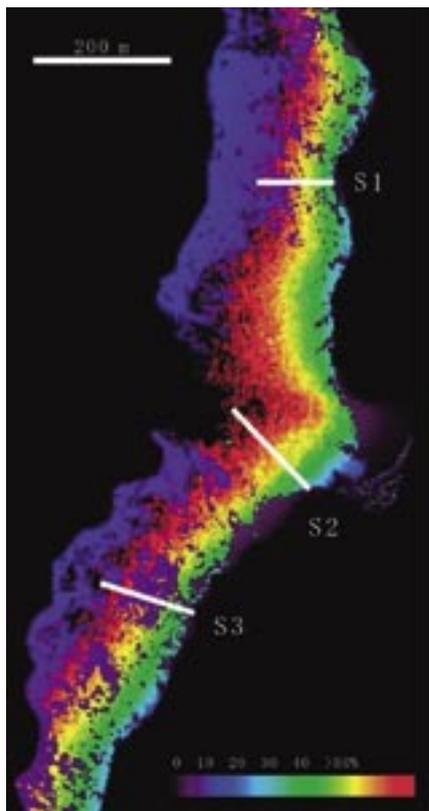
サンゴ礁生物の変化に加え、地形の変化がリモートセンシングにより明らかにされている。長谷川（1990a）は、1962年から1984年までの5時期の空中写真と気象データから、久米島ハテナハマの形態が台風によって変化することを示した。同様に、長谷川（1990b）は1970年から1984年までの4時期の空中写真を用いて、沖縄本島周辺の州島（チービシ、神山島）の変化を明らかにした（図12）。

8 隣接する陸域からの 表層土壌（赤土）流出

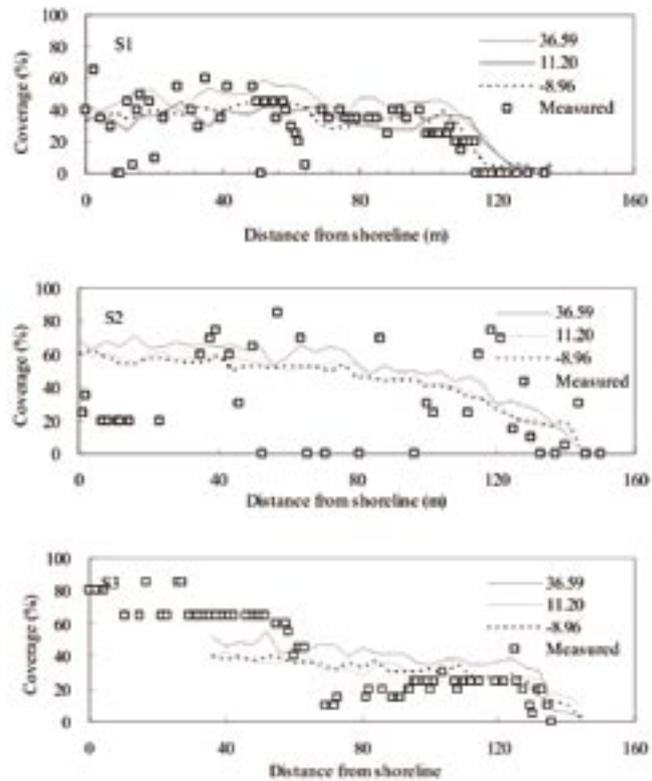
沿岸域における生態環境システムの保全にあたって、隣接する陸域からの環境負荷を適切に把握することが不可欠になる。琉球列島の多くの地域では、隣接流域における農地造成等の土地利用改変に伴う赤土流出すなわち表層土壌流出の問題が深刻である。この表層土壌流出は、陸域からの環境負荷の典型的なものであるが、その定量

的評価法となると、これまでのところ、USLE（Universal Soil Loss Equation）モデルに代表されるような、経験的な評価式によるものがほとんどである。しかしそのような方法は簡便さという利点はあるものの、対象流域ごと・時期ごとにパラメータ・チューニングの必要があるうえ、将来の土地利用変化等に対応した表層土壌流出量の予測を合理的に行うことが難しい、という難点がある。さらに、洪水時の土壌流出量の時間的な変化を表現することも原理的にできない。

これに対して、Paringit・灘岡（2001）、Paringit and Nadaoka（2003a）は、雨水の土壌浸透・表面流出過程やそれに基づく土壌侵食・輸送過程に関する分布型物理モデルと、地表面過程評価で重要となる植被状態を示すいくつかの植生指標（葉面積指数 LAI など）を衛星リモートセンシング画像データから適切に評価する手法を組み合わせた方法を開発することにより、表層土壌流出のモデリングを行い、現地データと比較・検証している。図13は、その一例を示したもので、石垣島轟川流域における出水時の赤土流出に関して、轟川下流部での赤土濃度の時系列についてのモデル計算結果を現地データと比較したものである。これから、濁度のピーク値のみならず時間変動パターンについても良好な一致が得られていることがわかる。



(a)



(b)

図14 (a) 対象海域での海草被覆率分布の推定画像、(b) 3つの測線上での被覆率に関する推定値と現地データ（推定値が3種類の線によって表されているのは、用いた Ikonos 画像が、3つの異なる角度で撮影されたものであることに対応している）

9 海草藻場のマッピング

藻場は沿岸生態系の重要な構成要素の一つであるが、藻場の時空間的な消長と周辺環境との関係のダイナミクスを明らかにしていくには、藻場の状態を多面的な観点からモニタリングすることが不可欠となる。衛星ないしは航空機リモートセンシングは、潜水調査に比べて広域的な藻場情報を周辺環境の状態も含めてモニタリングできる可能性があることから、その実用化に向けて、基礎となる合理的な藻場情報抽出アルゴリズムの開発が求められている。従来の方法は、現地データとの回帰関係式や何らかの統計分類的な手法に基づく経験的なものがほとんどであるが、その場合には対象海域や時期が異なるごとに truth データが必要となる上、SS やクロロフィル等の変動が重なるような場合の対処が難しくなる。

Paringit and Nadaoka (2003b) や Paringit ら (2003)

は、Paringit and Nadaoka (2002a, b) のサンゴ・キャノピー光学モデルをベースとして、海草藻場キャノピー光学モデルを開発している。具体的には、海草藻場を、特有の形態構造を有する有限層厚の散乱媒体としてモデル化し、その双方向反射特性や水中の SS・クロロフィル等の影響を放射伝達過程に理論的に組み込む形で海草藻場キャノピー光学モデルを開発している。モデル中には、藻場の平面的な被度や葉面積指数 LAI、キャノピー層厚、海草傾斜角などがモデル変数として組み込まれている。Paringit ら (2003) は、このようにして開発した光学モデルに、さらに逆解析アルゴリズムを組み合わせることによって海草藻場マッピングモデルを構成し、それを用いて石垣島吹通川河口前面の海草群落を対象に撮影された Ikonos 衛星画像を解析している。そして同時に行われた現地観測データとの比較により、本モデルによって海草藻場マッピングを合理的に行えることを示している。図14はその一例を示したものである。

10 海水温を中心とした物理環境モニタリング

海水温の広域的な分布やその時間的な変化を知る上でリモートセンシングは有用な手段であるが、通常よく用いられるのは NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) による海面水温 (SST) 分布データである。

この NOAA 衛星による SST 画像は数多くの利用例があるが、琉球列島を対象としたものとして、例えば、Nadaoka *et al.* (2001a) は、石垣島東岸の白保リーフ海域で観測された台風の来襲前後での海水温の急激な低下が、台風来襲前後での広域的な SST 値の低下に対応しており、それが台風による表層混合層での鉛直混合による水温鉛直分布の変化に起因することを示している。

また、Nadaoka *et al.* (2001b) は、1998年に琉球列島においても大規模に発生したサンゴ白化の程度に顕著な地域性があることに関して、その原因の一つとして、沿岸水温の地域性に着目した解析を試みている。解析にあたっては琉球列島のほぼ全域にわたる100地点以上の沿岸モニタリングポイントの海底近くに設置したメモリ式小型水温計のデータと、NOAA-SST および SeaWiFS 画像データを用いている。地域性が顕著な例として、サンゴ白化ダメージが相対的に低かった慶良間列島海域では、ダメージが顕著であった沖縄島沿岸域に比べて夏期の海水温が相対的に低くなる傾向があることを明らかにしている。この低温傾向を示す慶良間諸島周辺海域の領域が、沖縄島南西の慶良間諸島を含む陸棚域にほぼ一致することが一連の SST 画像の解析により示され (図15)、そのことと他の関連する数値解析の結果などから、慶良間諸島海域で夏期に相対的に低温傾向が現れる原因として、黒潮系の外洋暖水塊の沖縄島沿岸方向への波及がこの陸棚の縁辺部においてブロックされる、一種の「陸棚効果」の存在が大きいことが強く示唆されている。

このような短期的な海水温モニタリングとは別に、長期的なモニタリングの試みとして、1980年から NOAA を中心に NOAA 衛星による全球の水温モニタリングが行われており、高水温による白化現象の早期警戒システムおよびモニタリングシステムとして機能している (Strong *et al.* 1997)。2001年夏に琉球列島周辺では1998

年に引き続き白化現象が発生したが、現場測定と NOAA 衛星画像解析により、琉球列島周辺海域の水温が平年より高くなっていたことが明らかになっている (Strong *et al.* 2002) (図16)。

さらに、外洋における広域的な波高の値が衛星散乱計 (TOPEX/POSEIDON) によって計測されており (Fu *et al.* 1994)、波高とサンゴ礁の発達を比較する試みもなされている (Yamano *et al.* 2003a)。また、サンゴ礁内の流れのパターンをサンゴのパッチの配列から推定する試みもなされている (Yoshida *et al.* 2004)。

11 その他のリモートセンシングの例

サンゴの初期生活史を理解する上で、また、最近着目されているサンゴ幼生の広域輸送を知る上で、サンゴ卵・幼生の挙動を把握することはきわめて重要である。

灘岡ら (2002a) は、空中写真を撮影することにより、慶良間諸島での2001年6月のサンゴ一斉産卵期においてサンゴのスリック (海表面での卵・幼生の帯状集積体) を観察することに成功している (図17、18)。

また、灘岡ら (2002b) は、その後のサンゴ幼生の広域的な挙動をモニタリングするべく、新たに開発した GPS 搭載小型漂流ブイを上記のスリック観察と並行して慶良間諸島海域に投入する現地観測を行っている。その結果、図19に示すように、投入された8個の漂流ブイのうち5個が、複雑な経路をたどりながらも約4日間かけて沖縄島西岸の広い範囲に到達することが示された。この小型漂流ブイは、GPS 位置情報を一定間隔でメモリ上に記録することで漂流ブイの移動軌跡を記録するとともに、携帯電話システムを搭載し、それと陸上あるいは船上から通信することで随時漂流ブイの現在位置を知ることができるようになっている。また、アルゴスブイのような衛星通信システムではなく携帯電話システムを採用していることから、漂流ブイを小型で、しかもかなり安価に作製できるという利点を有している。

灘岡ら (2002b) は、この小型漂流ブイによる調査と同時に、短波海洋レーダ (HF レーダ) による海洋表層流速の広域分布モニタリング観測を行っている。図20はその結果の一例を示したものである。これから、この海域での流れは、時空間的にかなり複雑に変動しているも

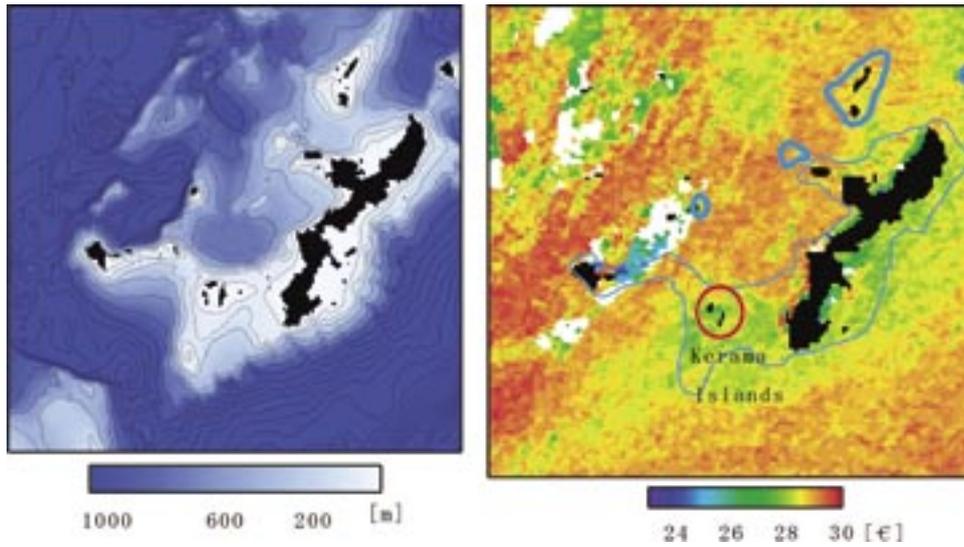


図15 左図：沖縄本島ならびに慶良間諸島周辺の海底地形。右図：NOAA-SST画像の一例(1999年6月24日、図中の青線は200mの等深線)

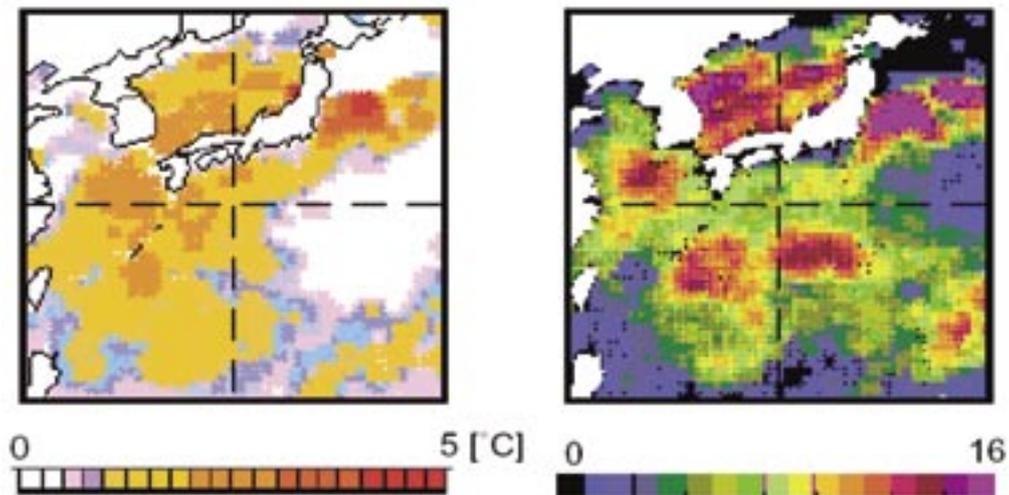


図16 NOAA AVHRRにより明らかになった2001年夏における琉球列島周辺域の高水温；Hot Spot（左図）と Degree Heating Weeks（右図）。（U.S. NOAA Coral Reef Watch Program より提供）



図17 航空機から観察したサンゴのスリックの例。慶良間諸島、渡嘉敷島

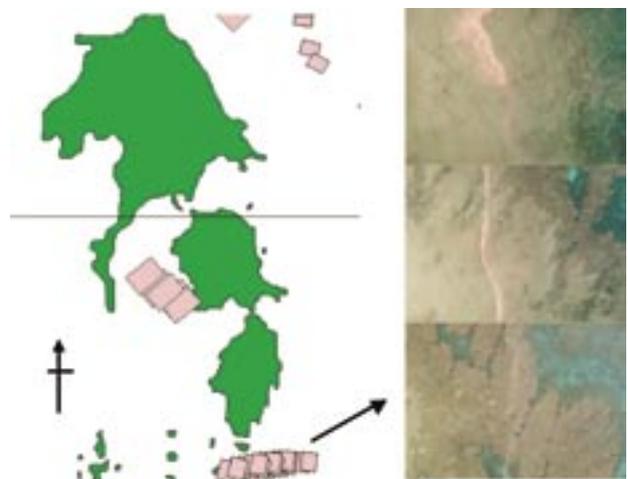


図18 航空写真の撮影範囲（左）とサンゴスリック（右）

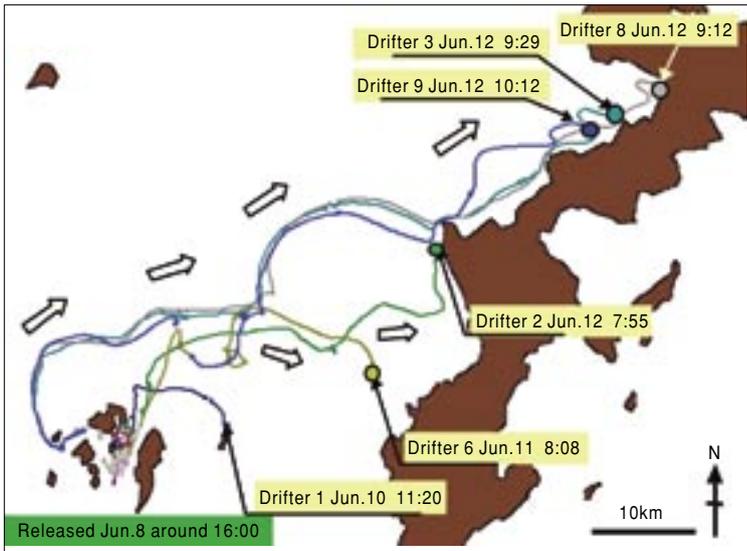


図19 慶良間諸島に投入した漂流ブイの軌跡

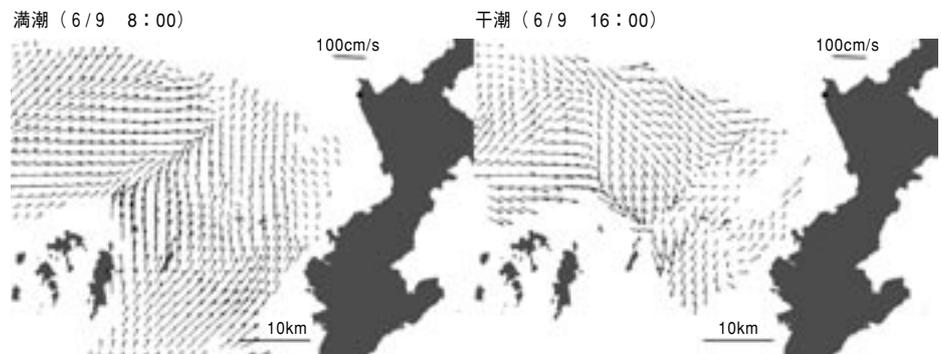


図20 HFレーダによる広域海洋表層流速分布計測例

の、上記の漂流ブイの軌跡に対応して、概して東向きないしは北東向きの流れとなっていることがわかる。この東ないしは北東向きの流れが生じる原因として、沖縄島南西海域の陸棚（図15）による地形効果が重要な役割を果たしていることが海水流動数値解析の結果などから示唆されている。

なお、灘岡ら（2002b）は、これらの現地調査と同時に実施した室内実験により、サンゴ幼生の探索行動率（定着場所を探す行動）が受精後約4日で最も高くなることを示している。このように、物理的に、慶良間諸島から沖縄島西岸域に海洋表層粒子が輸送され得るということが示されただけでなく、生物的にも、サンゴ幼生が、約4日という上記の輸送時間に整合する形で、探索行動率のピークを示すことが明らかにされた、ということは、慶良間諸島が沖縄島西岸域に向けてのサンゴ幼生のソースエリアになっていることを実証するものである。このことは、慶良間諸島を重点的な保全海域として保護する

ことに科学的な根拠を与えるものである。

12 おわりに

以上のように、日本においても、サンゴ礁研究と保全に対するリモートセンシングの活用例が蓄積されつつある。今後も技術の発展により、リモートセンシングの貢献はますます大きくなることが予想される。しかし、現状ではリモートセンシングを十分に活用している研究者や保全関係者は少ない。この原因の一つは、リモートセンシングの適用可能性や限界が十分に明らかにされていないことにあるのではないだろうか。こうした点をコストとベネフィットを含めて明らかにし、現地調査とリモートセンシング技術それぞれが補完する役割を担えるシステムを作り上げることが必要であろう。