

## 74 日本の亜熱帯海域における海草藻場の評価手法に関する研究

経済産業省

(委託先) 独立行政法人産業技術総合研究所

海洋資源環境研究部門

山室真澄

西村清和

岸本清行

電力エネルギー研究部門

野崎 健

加藤 健

根岸 明

大谷謙仁

農林水産省

(委託先) 独立行政法人水産総合研究センター

西海区水産研究所石垣支所

林原 育

清水弘文

佐野元彦

玉城泉也

福岡弘紀

皆川 恵

研究期間 平成 12 年度～14 年度

平成 14 年度当初予算額 23,861 千円

(研究予算総額 103,875 千円)

## Measurement of Seagrass Standing Crop Using Underwater ROV in Subtropical Coast in Japan

(FY2000-2002)

Masumi Yamamuro, Kiyokazu Nishimura, Kiyoyuki Kisimoto

Institute for Marine Resources and Environment

Ken Nozaki, Ken Kato, Akira Negishi, Kenji Otani

Energy Electronics Institute

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Takeshi Hayashibara, Hirofumi Shimizu, Motohiko Sano, Motoya Tamaki, Kouki Fukuoka, Megumi Minagawa

Ishigaki Tropical Station, Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency

Seagrass boundaries have been mapped with conventional aerial photography. Remote sensing further tries to determine the species composition, which are, however, difficult to apply to the species that live deep region down to depths of 10 meters. We developed the new mapping system of seagrass beds using ROV (Remotely Operated Vehicle) equipped with the underwater digital camera. The position of ROV was determined by DGPS (Differential Global Positioning System) and LBL (Long Base Line System) based underwater acoustic navigation system. It was also monitored with the video camera attached to the balloon. Automated differentiation between seagrasses and others in the digital pictures were processed with a commercialized software for remote sensing, which was proved to be satisfactory.

Conventionally, underwater video camera systems have been used for ground truthing aerial photography for mapping seagrass beds. However, such systems cannot be successfully applied to deep subtidal areas, because relatively small sized seagrasses are distributed there. Aerial photography cannot detect such species growing in deepwater areas. Also, the underwater video camera systems for ground truthing may easily fail to recognize such small species, or the video system may not operate at such depths. Because our ROV system uses an acoustic positioning system, a survey line does not need to be fixed beforehand, and the ROV can freely monitor any subtidal area.

There is a lack of information on the status and health of seagrasses worldwide, particularly in the less economically developed regions. We would like to propose the development of a standard method for monitoring seagrass beds worldwide using remote sensing technology, including aerial photography, together with our system. Our system can semi-automatically record high-quality digital images, which can be used for later rough identification of seagrass species at sites facing sudden disturbance by human activity.

## 1 はじめに

海草とは浅い海域に生息する顕花植物で、「海草藻場」と呼ばれる広大な群落を形成し、その栄養物質吸収機能や、多様な動物の初期成長の場として重視されている沿岸生態系である。特に亜熱帯・熱帯海草藻場は、それに依存している水産上重要な生物のみならず、ウミガメ類やジゴンなどの絶滅危惧種、さらには海草藻場によって栄養物質や懸濁物質がトラップされることで好適な環境を維持していると考えられており、サンゴ礁生態系の保全にとっても重要な場所である。

日本では亜熱帯海草藻場は沖縄県を中心には分布する。環境庁が 1989 年に行った結果をまとめた報告書によると、亜熱帯海草藻場は 1978 年の前回調査より増加していた。報告書ではこの結果を過大評価によるものと解釈し、その理由として短期間で増減する種類が存在することと、空中写真の読みとりに伴う誤差が大きいことを指摘している。

日本の温帯域に分布する海草はアマモ類で、長さ 1m 以上のものが大部分であるが、亜熱帯域においては 7 属 10 種が分布し、最も小さいウミヒルモ類は長さ数 cm、最も大きいウミショウウブでも長さ 1m くらいまでである。海草藻場の分布を調べ

る為に従来行われた方法は空中写真の判読だが、亜熱帯海域のように小さい種類を観測する手法としては限界があり、このことが空中写真の判読による分布調査の誤差の原因の一つであると考えられる。

本研究では亜熱帯海域の海草藻場の分布を正確かつ簡便に調査できるように、水中カメラを装備した ROV (Remotely Operated Vehicle) を海底から一定の水深で走行させて、得られた画像から現存量を推定する方法を開発した。この水中ロボットは GPS (Global Positioning System) と音響による測位システムを搭載しており、予め設定した測線上を移動できるように設計した。そこがどのような場所かは、搭載したビデオカメラからケーブルが母船に伸びており、リアルタイムで見ることができる。母船では操縦者が様子を見ながら、先端に附属したコドラーートを海底に降ろし、そのコドラーートの枠を写し込む形で 500 万画素のデジタル写真を撮る。水深や緯度経度は同期データとして母船のパソコンに記録される。写真はデジタルなので、デジタル情報としてパソコンに移され、一定のアルゴリズムで半自動的に被度が計算される。得られたデータは地理情報システム (GIS) に統合し、一般にも

利用しやすいデータベースの構築を目指した。

海草の状態に関する情報は世界的に不足しており、特に開発途上国において著しい。このため UNEP の世界保全およびモニタリングセンターでは地球規模での海草の調査を行っている。また地域レベルでのモニタリングプログラムもオーストラリア、地中海、カリブ海、西太平洋、米国など世界各地で行われている。本研究では、別途、船上係留気球を用いた海底の広域画像を取得するシステムも開発し、海図や航空写真の入手が困難な開発途上国でも GIS データとしてデータを整理することができるシステムの完成を目指した。

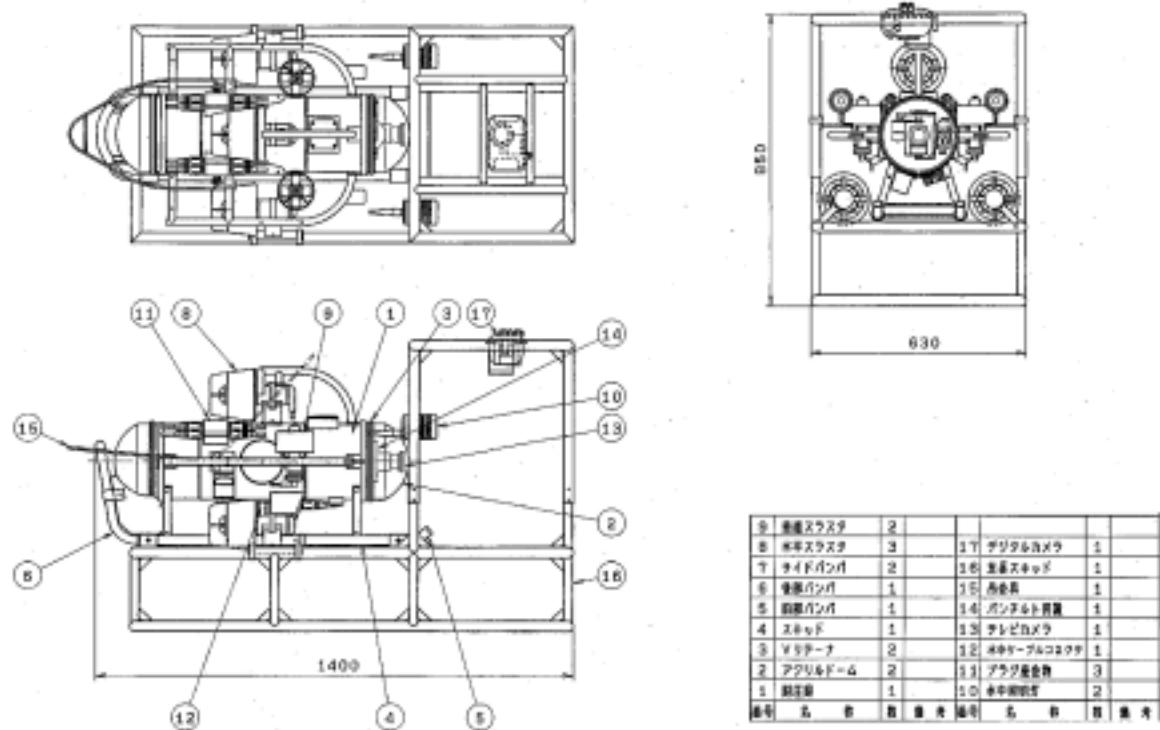
## 2 水中走行ビデオシステムの研究開発

実証実験を行った沖縄県の亜熱帯海草藻場には種々のサイズや形態をした海草が繁茂しているため、水中カメラとコドラーートを装備した ROV (以下、「水中走行ビデオシステム」とする) の試作に当たっては、安全性と撮影地点の自動記録等による作業効率向上を図ると共に、画角一定で撮影するダイバー等による従来のコドラーート法との対比が可能なように、海底からの ROV 高度を一定に保つ機構等の研究開発を目標とし

た。さらに、本システムを実海域で試運転し、技術的問題点および改良点を抽出し、運用技術の研究開発を進めた。

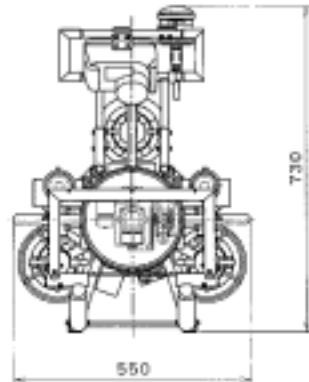
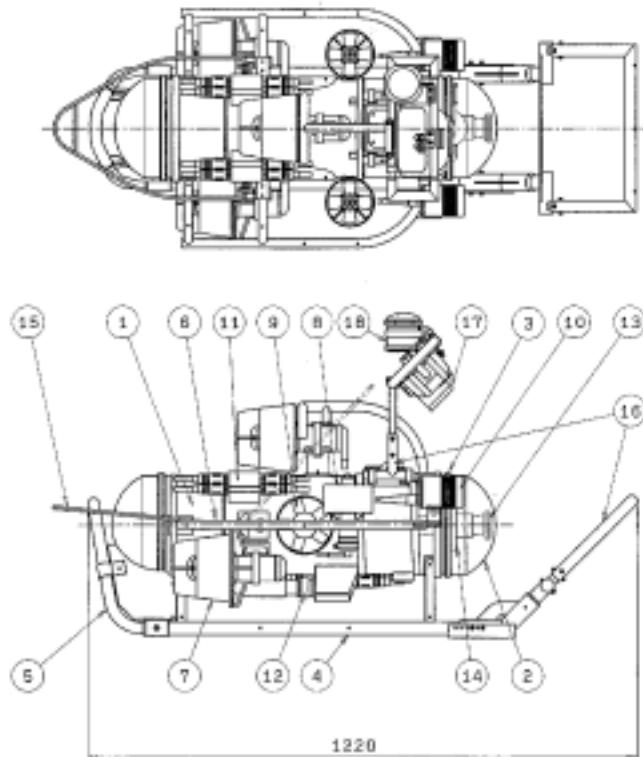
本研究システムは GPS、トランシスジューサー、ビデオカメラを搭載し、船上からの遠隔操作で ROV の位置と状態を確認しながら藻場を撮影する事を可能にした。所定の地点の海底を高分解能水中デジタルカメラ (500 万画素) で撮影するシステムであり、三井造船 (株) 製 RTV-100 Mk2 型をベースとして上記目標を達成するように、設計・改良・試作を進めた。

平成 12 年度は図 1 に示す足長スキッドを上記 ROV に付加することにより海底から一定距離での静止海底画像を撮影した。しかし、足長スキッドを含む ROV の外寸が  $630 \times 1400 \times 850$  (幅・長さ・高さ、単位 mm) となり、実運用あたって小型船上での作業が困難であるだけではなく、ROV 搬送用容器が石垣島などの離島の航空貨物の寸法制限を越えることが明らかになった。



そこで平成 13 年度は、図 2 の改良型 ROV に示すように ROV を海底に対して傾けて撮影するように藻場観測用フレーム (従

来法のコドラートに相当) を ROV 水平袖に対して 45 度傾けて取り付けるように改造した。



| 品名         | 番号 | 品名         | 番号 | 品名 | 番号 |
|------------|----|------------|----|----|----|
| GPS        | 18 | GPS        | 1  |    |    |
| デジタルスチルカメラ | 17 | デジタルスチルカメラ | 1  |    |    |
| 藻場観測フレーム   | 16 |            |    |    |    |
| 水平袖        | 15 |            |    |    |    |
| モニターラック    | 12 |            |    |    |    |
| アクロスティック   | 11 |            |    |    |    |
| GPS        | 10 |            |    |    |    |
| モニターラック    | 9  |            |    |    |    |
| アクロスティック   | 8  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 7  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 6  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 5  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 4  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 3  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 2  |            |    |    |    |
| モニターラック    | 1  |            |    |    |    |

図 2 傾き 45 度の観測用フレームを取り付けた改良型水中走行ビデオシステムの構造図

その結果、撮影用フレームを含む ROV の外寸は 550×1220 ×730(幅・長さ・高さ、単位 mm)と小型化され、船上作業が容易で、航空貨物としても搬送できるようになっただけではなく、水中での走行抵抗がほぼ半減し、ROV の制御が大幅に改善された（特願 2002-303501）。運用中の改良型 ROV システムを図 3 に示す。このように ROV を傾けた姿勢で海草を撮影するのには操作に熟練を要するが、図 4 に示すように撮影した海草画像にはブレなどは認められず、鮮明な画像を取得できた。これにより、ROV を海底に対して一定の角度（トリム角）でコントロールするなど実用性を高めるための改造点はあるものの、本研究開発の水中走行ビデオシステムは基本的には完成したものと判断した。なお、市販のプラスチック容器を改良して ROV に取り付けたデジタルスチルカメラの耐圧容器は、耐圧が水深 25m まで、それ以上深くに出現する海草の調査は不可能であるだけではなく、容器の強度や信頼性も満足できるものではなかった。

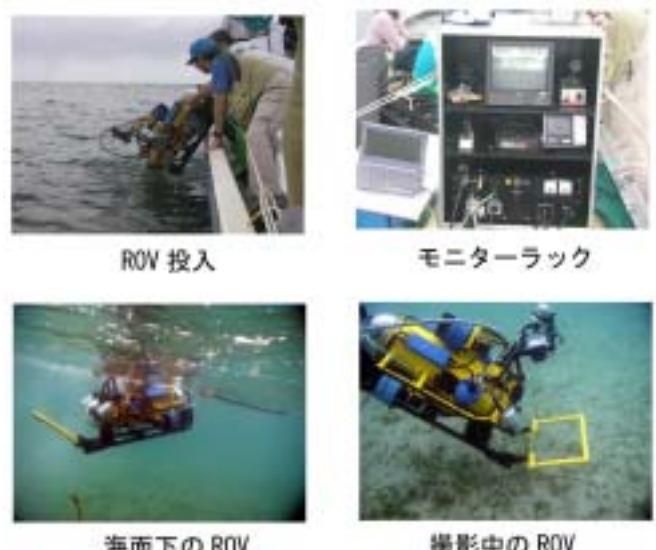


図 3 運用中の改良型水中走行ビデオシステム

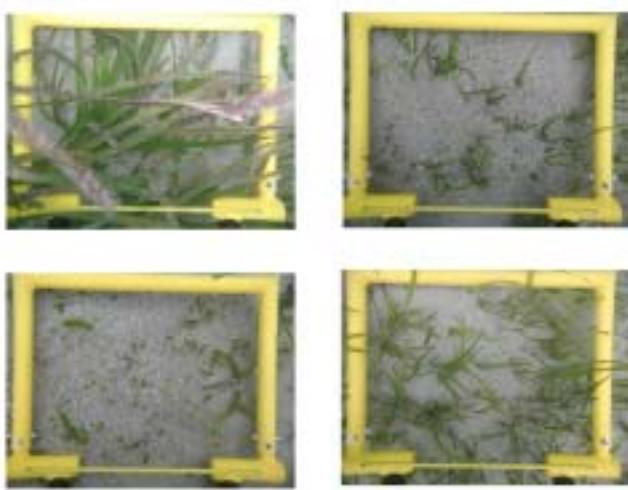


図 4 改良型水中走行ビデオシステムで撮影した海草画像

平成 14 年度は、ROV の使用水深と同じ 150m に耐える耐圧容器を新たに製作した。耐圧容器を図 5 に、ROV に組み込んだ状況を図 6 に示す。また、図 7 に示すように操作に熟練を要するトリム角の制御をボタン（図中の自動トリム 45 度スイッチ）一つで作動するトリム制御機構を設け、船上での操作の簡便化を進めた。このほか、カメラの耐圧が高くなつたことにより、調査領域を水深が急に深くなるリーフエッジまで拡張できるようになったので、藻場観測用フレームを取り外してカメラ位置を図 8 に示すように低い位置に換装出来るよう ROV システムの改良を加えた。カメラ位置の換装を含む、全体の ROV システムを図 9 に示す。これにより水深が深いためケーブルの繰り出し量が多く水流の影響を受けやすいリーフエッジで、かつ水流が激しい状態でも安定に ROV を制御できるようになった。



図 6 耐圧カメラ容器（写真右上の黒い円筒形容器）を取り付けた改良型水中走行ビデオシステム

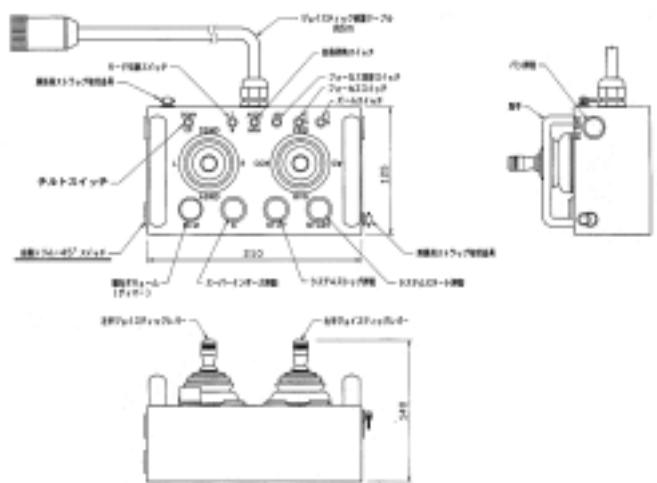


図 7 改良型コントローラー

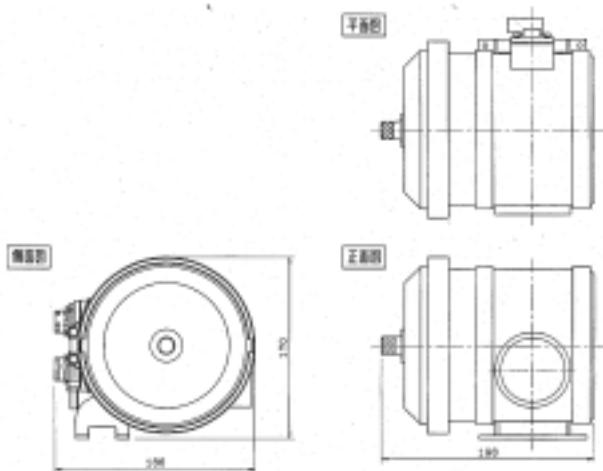


図 5 500 万画素デジタルカメラ用水中耐圧容器の構造図（150m 耐圧）

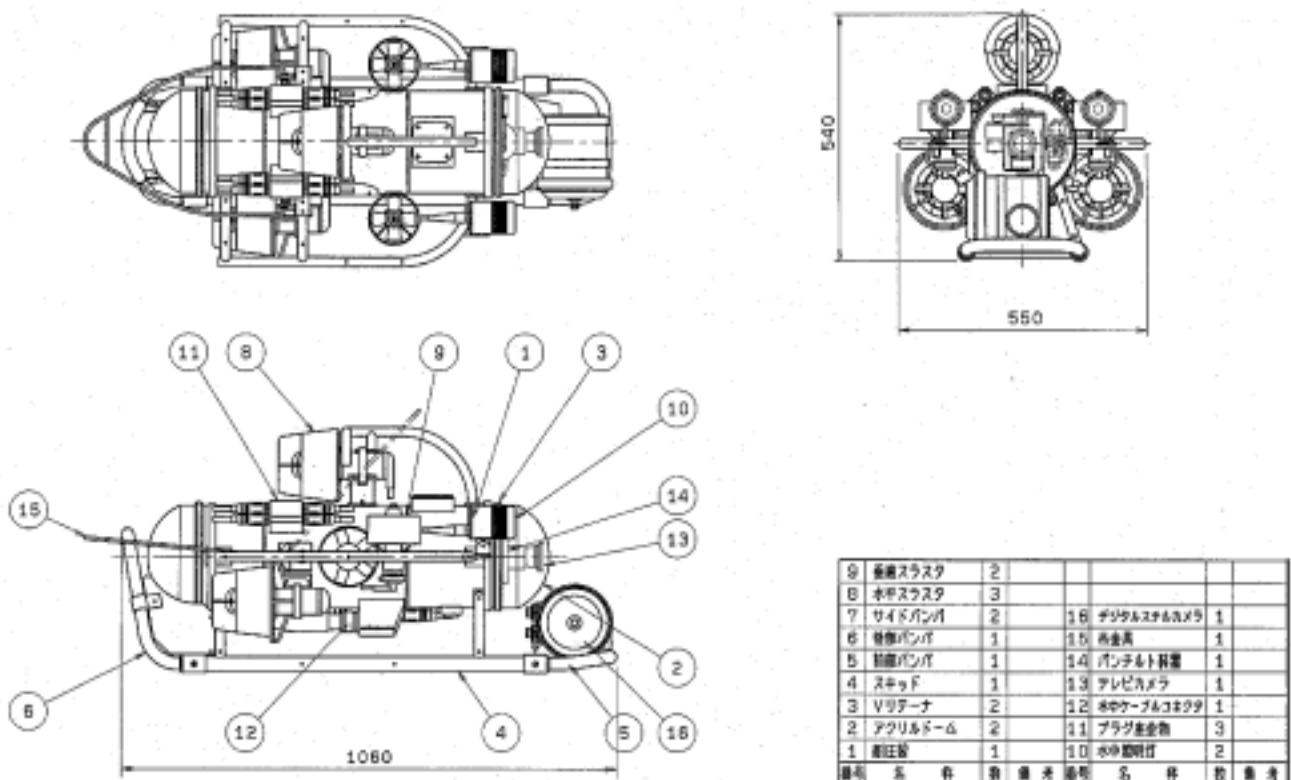


図8 使用領域拡張型水中走行ビデオシステム

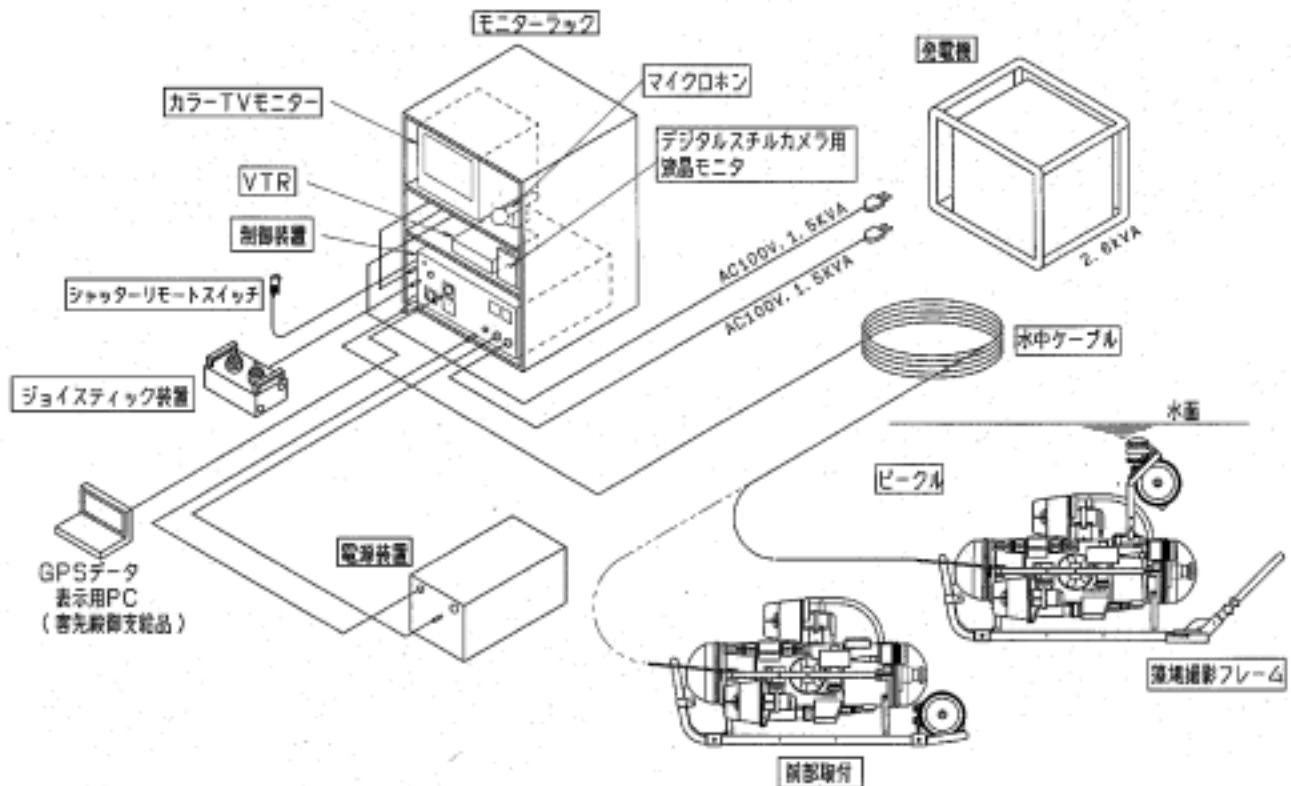


図9 改良型水中走行ビデオシステム概念図

### 3 係留気球による統合測位システムの研究開発

平成 12 年度の水中走行ビデオシステムの運用により、搭載されたビデオカメラのモニター画面で狭い領域を見ながら ROV を操縦すると、調査海域全体のどの位置に ROV があるのか、どの方向に進めれば良いのかが分からぬなどの、運用上の問題点が明らかになった。特に、浅瀬の岩礁等にケーブルが絡むと、ROV を制御するオペレーターの搭乗するボートを近づけることができないので、ダイバー等の作業が必要になり、

ダイバー無しで水中走行ビデオシステムを運用する利点がなくなる。

このため、平成 13 年度は、小型無人飛行船あるいは係留気球を用いて上空から ROV 及び電力・信号ケーブルを常時監視するモニターシステムを考案した。ROV をモニターするための小型無人飛行船および係留気球の写真と、このシステムで取得したデジタルカメラ画像を図 10、11 に示す。



a 小型無人飛行船および係留気球



b 小型無人飛行船の腹部に取り付けたデジタルカメラ、  
ビデオカメラとテレメータシステム



c 海上で作業中の観測船と係留気球



d 係留気球の腹部に取り付けられたデジタルカメラ

図 10 小型無人飛行船および係留気球による海底・海面画像取得システム



図11 小型無人飛行船が撮影した石垣島サンゴ礁の画像

また、サンゴ礁や海草藻場の航空写真画像に、同じ場所の船上係留気球による画像を張り合わせた結果を図12、13に示す。



図12 石垣島吹通川付近の航空写真

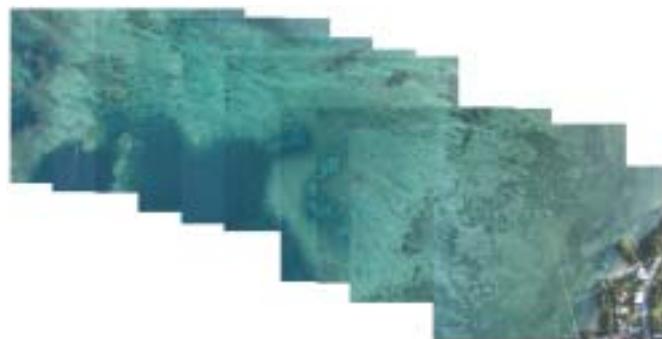


図13 石垣島吹通川付近の係留気球から撮影した合成画像

上記のような係留気球等をプラットホームとするモニターとROVを組み合わせて立体的に運用するシステムは世界的に例がなく、全く新しい手法である。ROV上空モニターのプラットホームとして、農業用無人ヘリコプター、小型無人飛行船、小型船上に係留された気球を比較検討した結果、農薬用無人ヘリコプターはエンジン故障時等に海中へ墜落する危険があるので、小型無人飛行船あるいは船上係留気球を検討することとした。以下に、検討対象とした小型無人飛行船および船上係留気球の仕様を示す。

#### 小型無人飛行船の仕様

- 寸法：全長 11.5m、最大直径 3.6m、機体容積:68m<sup>3</sup>、2) 有効積載重量:20kg、3) 制御：リモコン手動、4) 連続運用時間：2時間、5) 許容瞬間風速:10 m/s 未満、6) 運用要員数：4人、7) その他：格納用テント等を含み、石垣島などの離島に搬送可能。

#### 船上係留気球の仕様

- 寸法：全長 5.2m、最大直径 2.3m、機体容積:12m<sup>3</sup>、2) 有効積載重量:7kg、3) 制御：リモコン手動、4) 連続運用時間：

エンジン用燃料を必要としないので、運用時間の制限無し、5) 許容瞬間風速:10 m/s 未満、6) 運用要員数:2 人、7) その他:ケーブル巻き取り用ワインチ等を含み、石垣島などの離島に搬送可能。

平成 13 年度の研究開発により以下の結果が得られた。すなわち、船上係留気球に比べて小型無人飛行船は広範囲をモニターするのに適しており、陸上と海上を同時観測する場合や、係留気球を搭載した小型船が接近できない水深 1m 未満の汀線を干潮時に上空からリモートセンジングするのに適している。しかし小型無人飛行船は、許容瞬間風速未満の風でも高度・位置等を一定に保つのが難しいので、常時母船の直上に滞空して ROV 及び電力・信号ケーブルを監視するには不適当である。係留気球の場合は係留索で母船につながっている為、特に制御をしなくとも気球が風に向くように定位し、母船をカメラの視野内に捉えることが可能である。このため、上空モニターシステムとしては、船上係留気球が適していると判断された。

以上の成果に基づき、平成 14 年度は以下の研究開発を実施した。

①係留気球で撮影した画像を GIS (地図情報システム) 化するためには、画像の位置、方位、縮尺、カメラの水面に対する傾き (チルト角) のデータが必要であるが、係留気球は有効積載重量が小さく、気球の位置および方位、高度を測定するための装置を搭載することが不可能である。また、海上にランドマークを求めることが難しい。ところが、係留気球から得られる画像には上述のように係留母船が写し込まれており、この母船をランドマークにすることで、図 14 の概念図に示すように船の位置、船首方位、船の大きさより取得画像の位置、方位、縮尺が求められる (特願 2002-315265)。

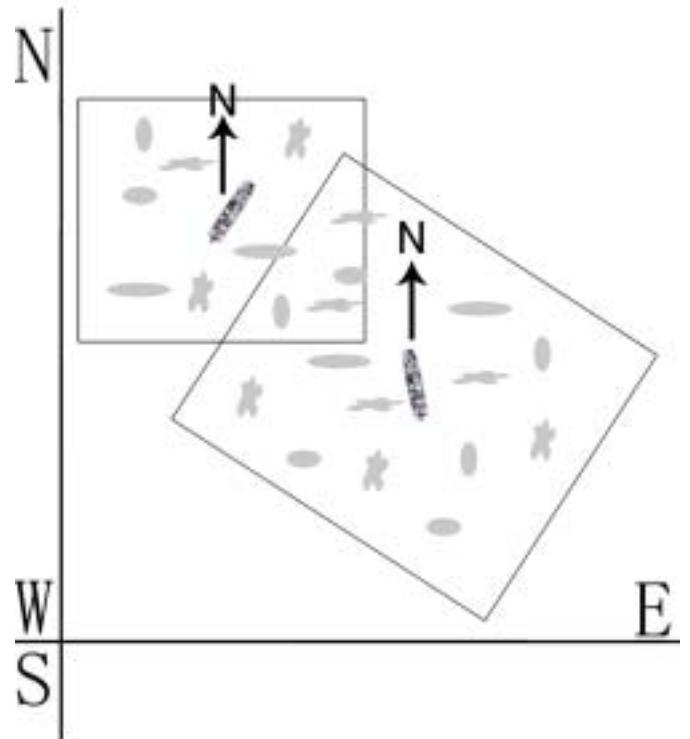


図14 取得画像の位置・方位・縮尺を、写し込まれた係留母船位置から求める方法

②母船には GPS 受信機を搭載し位置を求めていたが、平成 14 年度より GPS ジャイロを搭載し方位データの取得も可能になった。このジャイロを用いて、船の航行方向をチェックし、一定方向の画像取得も可能になった。気球搭載カメラはミノルタの 500 万画素デジタルスチルカメラ DiMAGE7 を用いた。上空 300m での撮影領域は 386m × 290m で 1 画素の大きさは 15cm<sup>2</sup> となる。より高画質で、広画角撮影が可能なデジタルスチルカメラを用いることで広範囲の画像取得が可能となり、画像取得時間が短縮される上に、広い範囲で ROV を監視できる。

そこでニコンの 500 万画素デジタルスチルカメラ・クールピクス 5000 にワイドコンバーターを取り付けて広画角としたものをミノルタ製 DiMAGE7 と同時に気球に乗せ運用し比較検討した。ニコン製の上空 300m での撮影領域は 567 × 425m で 1 画素の大きさは 22 cm<sup>2</sup> である。ミノルタ製の合成画像と拡大図を図 15 に、ニコン製の合成画像と拡大図を図 16 に示す。



図15 気球に搭載したミノルタ製 DiMAGE7で撮影した上空 300m の合成画像と係留母船の拡大画像



図16 気球に搭載したニコン製クールピクス5000とワイドコンバータ ーで撮影した上空300mの合成画像と係留母船の拡大画像

以上の画像分解能は航空写真と大差ないが、気球の高度を下げるか狭角レンズを使用すればより高分解能の画像を取得可能である。なお、海中の海草の画像は海面の波浪の影響を受けるので、波の少ない気象条件下でも数 cm 以下の高解像度を達成することは困難であることがわかった。また、最近、市販された 1400 万画素のデジタルスチルカメラ、キャノン EOS-1Ds に焦点距離 14mm の広角レンズを取り付ければ、高度 300m で撮影領域  $771 \times 514\text{m}$  で 1 画素の大きさは  $19 \text{ cm}^2$  が可能となる。

この気球は一人でも図 17 に示すように係留して持ち運べることから、100m のケプラーケーブルを付けた気球を人が持ち、吹通川河口のマンガロープ林を川面の上空が空いている最上流の場所まで徒歩で遡上し、空撮する事を試みた。図 18 にマンガロープ林の空撮画像を示す。同行した GPS 受信機を持つ位置決め要員も写し込まれている。吹通川のような川幅が狭く水深も浅く小型船が入れない場所でも、人間が歩け、上空が空いていれば、人力による係留気球の運用が可能であることがわかった。



図17 係留気球を人力で持ち運び吹通川マンガロープ林を空撮している様子

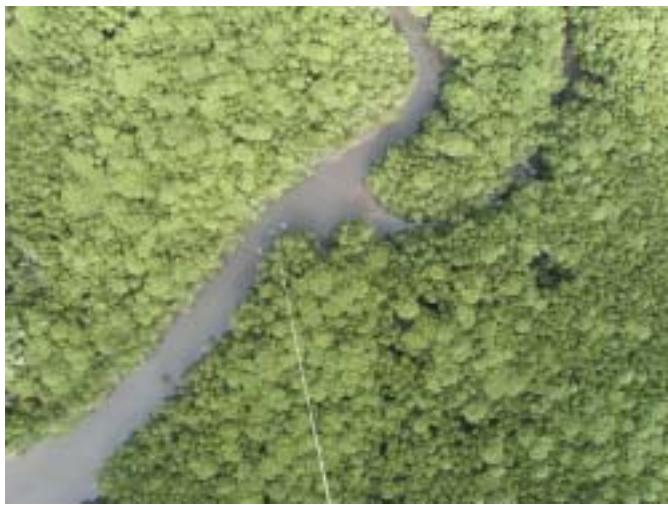


図18 係留気球を人力で持ち運び吹通川マングローブ林を空撮した結果

ROV と係留気球を別の母船に乗せ上空から ROV の様子を監視したときの様子を図 19 に示す。上空からのテレメトリー画像を母船上でリアルタイムでモニターし ROV の監視を行う場合、免許が不要な特定小電力無線機を用いて気球から画像を送るが、電波の伝送距離が 100m を超えると、信号が小さく受信が難しかった。リアルモニター画像は NTSC 方式のテレビ画像として送られるため、解像度が最良で 35 万画素に劣化するので、100m 以下の高度で監視する必要があり、広範囲の監視が難しいことが判明した。このため、今後はハイビジョン等の高画質動画モニターを搭載するとともに数百 m を安定して伝送できる小型軽量のテレメータの研究開発が重要である。



図19 係留気球を用いたROVの監視

#### 4 水中走行ビデオシステムにより得られた画像のデータ解析

平成 12 年度は水中走行ビデオシステムにより得られたデジタルカメラ画像の緑 (G) チャンネルについて、大津の方法で教師なし 2 値化する方法を開発した。

ROV システムはデジタルカメラを搭載しており、撮影写真 (図 20) はそのままデジタル値として数値計算できる。被覆度の計測に当たっては、このデジタル画像の各画素を海草を写すものとその他 (砂地や石・サンゴ等) を写すものとに分類し、その画素数の割合を被覆度とした。この分類ではデジタル画像は 2 値 (海草とその他) で表すため量子化レベルが 2 つの 2 値画像である。しかし、実際には自動処理によって完全に上記 2 値に分類することが困難な画素領域が存在するため、人間の後処理によって評価されるべき「不明」分類を含む 3 値画像を出力する自動化処理を作成した (図 21)。



図 20 撮影画像のサンプル

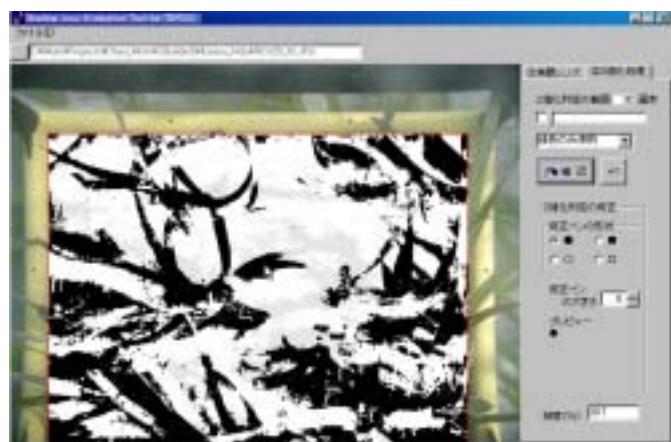


図 21 被覆度測定ツール

各画素を対象 (海草) と背景 (砂地等) に分類する 2 値化法は、輝度のある閾値  $T$  を境目にして輝度値を 0 か 1 に変換

する処理である。屋外の、しかも海中で撮影された写真の場合には、各画素ごとに閾値を変える動的閾値処理が適当であった。閾値の決定は大津の方法と呼ばれる閾値自動決定法を用い、画像の輝度ヒストグラムから統計的な意味での最適値を決定した。海草の色が緑であることから緑 (G) チャンネルの輝度値のみを用いて閾値決定を行ったが、撮影時のストロボのムラや砂地の模様等の明暗を海草として誤判別する可能性があった。そこで、赤 (R) チャンネルと青 (B) チャンネルの輝度情報も用いて判別が困難な箇所には不明のフラグを出力画像に描き込むこととした。図 22 に、実際に ROV が撮影した海底写真を用いて、海草群とバックグラウンド (主に砂地) を分類した結果を示す。黒く塗りつぶした画素が海草領域として判別された画素である。灰色の画素は、不明箇所として人間による修正を要求している箇所である。このような箇所は視認による修正を行い、最終的には海草とバックグラウンドの分類による 2 値画像とした。この海草分類の画素の面積比を被度の推定値とした結果も図 22 に示した。

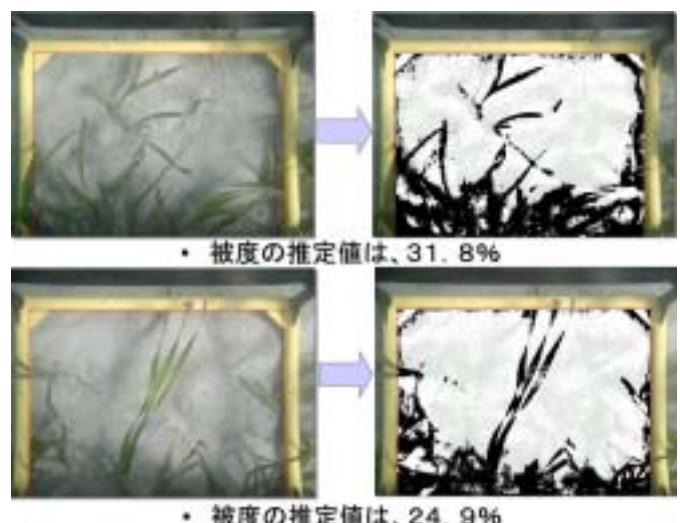


図 22 大津判別法による海草画素の判別結果と被覆度計算

今回検討した大津の自動判別法による海草分類では、必ずしも完全な判別ではないが、水中走行ビデオシステムが撮影した写真の自動処理によって海草の区分が可能となった。判別困難な領域については、もう 1 つの判別指標を与えることによって (3 値化)、人間による後処理を簡便にするものとした。

平成 13 年度は気球搭載カメラ画像による藻場の被覆分類も

行う必要が生じたので、市販のリモートセンシングソフト (SBGLOBE-I) をデジタルカメラの RGB 画像も処理できるように改良して使用した。水中走行ビデオシステムで取得した海草画像を、改良したリモートセンシングソフトで被覆分類処理した結果を図 23 に示す。元画像 (RGB カラー) と各種分類法を比較すると、教師付き最尤法と教師なし最短距離法が比較的よく海草を分類しているように思われる。

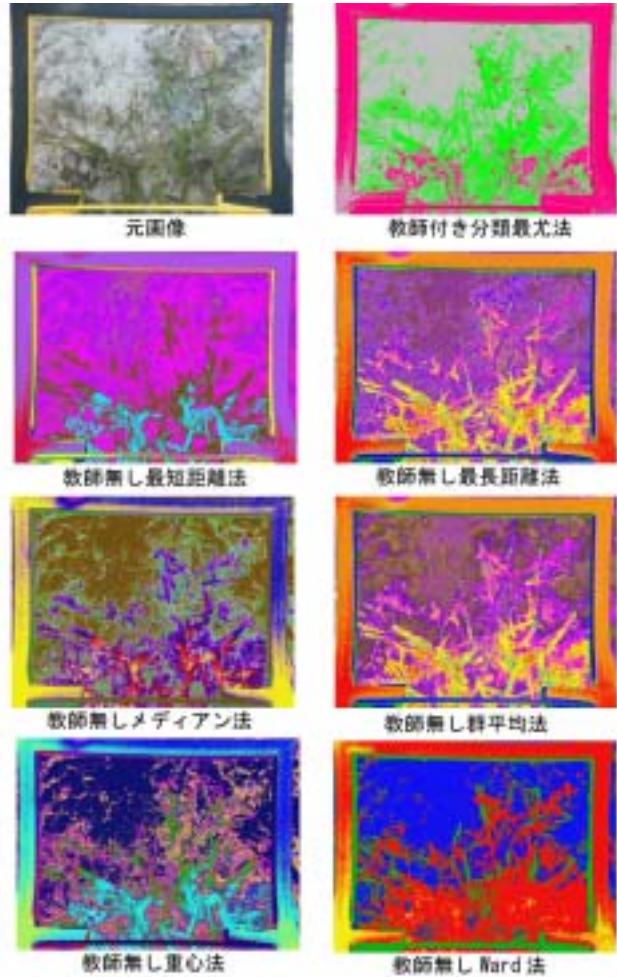


図 23 水中走行ビデオシステムが撮影した海底画像を使った市販ソフトによる分類結果

次に、高度 300m の係留気球から撮影したデジタルカメラ画像を被覆分類処理した結果を図 24 に示す。図中、教師付き最尤法は、原画像上でグランドトルースが既にわかっている海草（緑）、砂地（グレー）、サンゴ（赤）、白色のボートおよび気球係留用ケーブル（白）をトレーニングデータとして分類したもので、現地の実地観察結果と良く合っている。

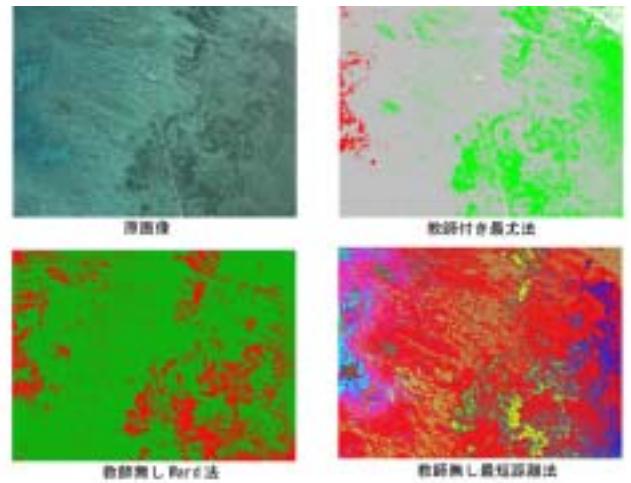


図 24 気球搭載デジタルカメラの空撮画像を使った市販ソフトによる分類結果

なお、右上の白色に分類された部分は、ごく浅い砂地の部分が誤分類されたものである。これに対して、教師なし最短距離法では海草の明瞭な分類が困難であり、教師なし Ward 法では海草とサンゴが識別できず同一に分類された。

上記リモートセンシングソフト (SBGLOBE-I) によるデジタルカメラ画像データの解析では赤青緑の可視 3 バンドのみを使って分類しているのに対して、衛星画像データを処理する場合、通常、可視 3 色に赤外を加えた 4 バンドを使って分類する。そこで、参考のために 4 バンド衛星データとして LANDSAT 5 画像を使用し、被覆分類が既知の石垣島白保地域を対象として分類した結果を図 25 に示す。グランドトルースに基づく教師付き最尤法がもっともよく合うが、海草域と海藻域の分離ができない。教師なしの場合では最短距離法および群平均法では海域と陸域が明確に分類され、最長距離法では陸域、浅海域、海域の分類ができた。以上から明らかなように教師付き最尤法を使えば 4 バンド、3 バンドのいずれも海草を分類可能であることがわかった。

本研究開発では ROV 搭載のデジタルカメラ画像のグリーンチャンネルについて、自作のプログラムを用いて大津の方法で教師なし 2 値化する方法を開発した。しかし、気球搭載カメラ画像による藻場の被覆度解析では各種の群集が共存するので、グリーンチャンネルのみを用いる大津法では解析困難であり、デジタルカメラ用に改良した市販リモートセンシングソフトにより気球搭載カメラ画像が被覆分類できることを確認した。

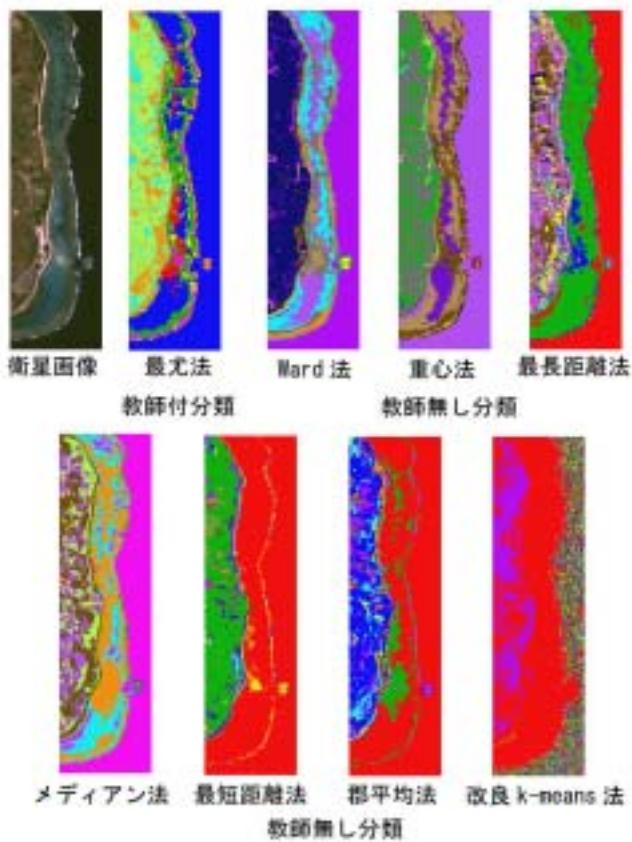


図 25 衛星データ (LANDSAT 5) を使った分類結果

さらに、市販のリモートセンジングソフトには気球搭載カメラの海面に対するチルト角の幾何学補正ソフトウェア（直角座標補正あるいは GPS 位置データ等による緯度経度補正）が標準的に搭載されているので、被覆分類データの GIS 化が容易に実施できる利点がある。しかし海上には明確なランドマークがないので、第 5 節で解説する水中測位システムの GPS 付きトランスポンダーを緯度経度補正の基準点にするか、第 3 節で解説した気球搭載カメラの撮影時に母船をランドマークにすることで、船の位置、船首方位、船の大きさより取得画像の位置、方位、縮尺を求めるにあたって（特願 2002-315265）、気球搭載カメラの海面に対するチルト角のデータを気球搭載カメラの撮影時に同時に測定する必要がある。

以上により、市販のリモートセンジングソフトでもデジタルカメラ画像を処理できるように改良できることができたので、衛星画像、航空写真、気球搭載カメラ画像、ROV 搭載カメラ画像を同一ソフトで一元的に処理することにより、一般のユーザーにも本システムを使用できる条件が整ったものと判断した。

## 5 水中走行測位システムの研究開発

本研究で開発中の水中ビデオシステムは小型の ROV とデジタル画像撮影装置から構成されており、観測母船から遠隔操作で調査を行う。この際、ビデオシステムの正確な位置情報を得ることは、ROV のナビゲーションおよび調査精度を上げるうえで重要となる。そこで、水深数 m から数 10m の海域を対象とした水中測位システムの開発を行った。

### 5-1-1 測位システムの検討

海域で利用できる測位方式は GPS (Global Positioning System) を含む電波測位と音響測位である。GPS 測位は簡便に測位を行うことができるが、数センチたりとも GPS アンテナが海中に没すると、GPS の電波は遮断され、受信不能となる。したがって、ROV が浮上したときしか測位が行えず、水中では音響測位に頼らざるを得ない。音響測位システムとして LBL (Long Base Line System) や SSBL (Super Short Base Line System) が利用可能である。

LBL 測位方式は図 26 に示すように 3 個以上のトランスポンダを海底に設置し、船上 (ROV) のトランシューサと各々のトランスポンダ間の直距離 (slant range) を音波の往復伝搬時間から測定することにより、船 (ROV) の位置を測定することができる。予め海底に設置した 3 個のトランスポンダの深度と位置を決定しておかなければならぬ (calibration と呼ぶ)。トランスポンダの海底設置や calibration が必要なため、取り扱いが煩雑となるが、測位精度は良い。

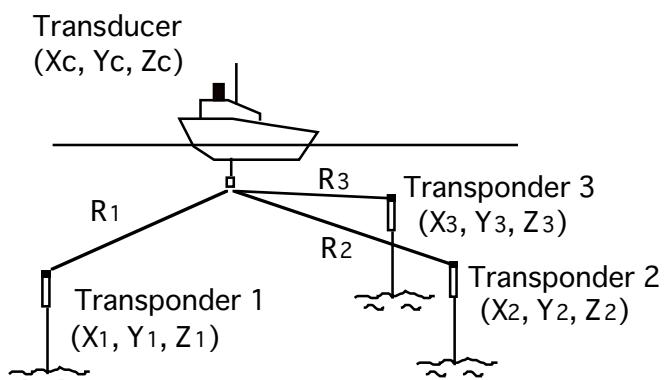


図 26 LBL (Long Base Line System) 測位方式の概念図

SSBL 測位方式は音響信号の到来方向の角度を 2 つの受波器間の到来音波の位相差から求め、同時に送受波器と対象物の

トランスポンダまたはピンガとの間の伝搬時間を測定する(図27)。これにより対象物までの slant range と方向がわかり、対象物との相対位置を特定できる。SSBL はトランスポンダの海底設置が不要で取り扱いが容易であるが、測位精度は低い。本開発では、LBL および SSBL 両方を試作し実用性を試験することとした。

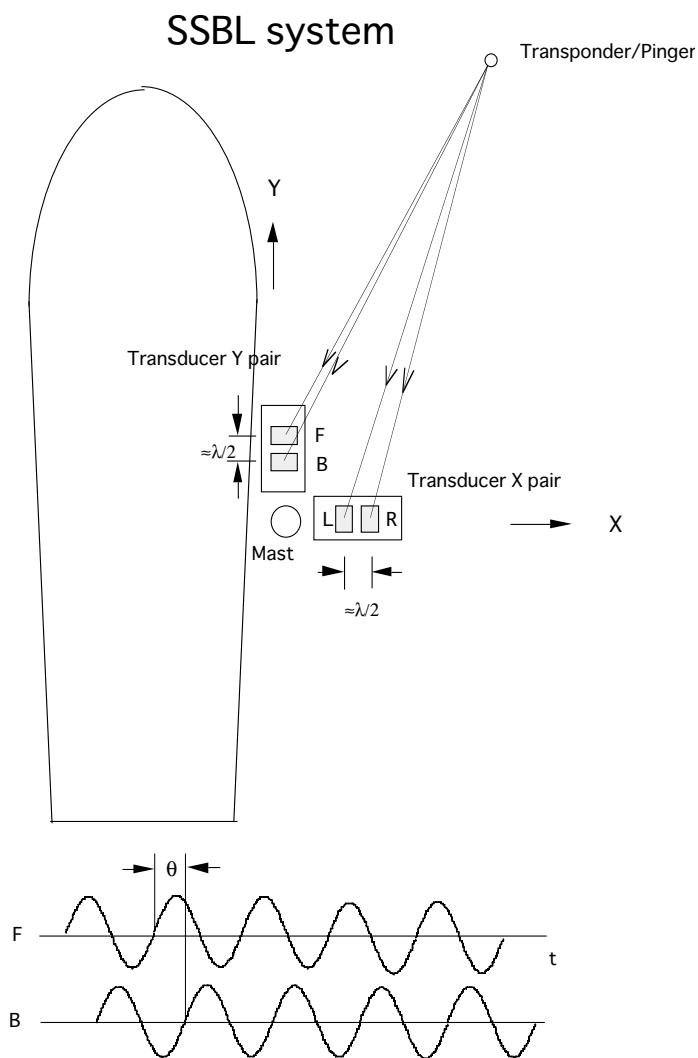


図27 SSBL (Super Short Base Line System)測位方式の概念図

GPS の受信方式には、GPS 受信機一台で行う単独測位、GPS 受信時の各種の誤差をキャンセルし、測位精度を向上させたディファレンシャル GPS(DGPS)、数 cm の精度を有する干渉測位法が存在する。2000 年 5 月から SA (Selective Availability : 測位精度の作為的な劣化操作) が解除され、測位精度が従来に比べ改善された。本開発ではメートルオーダーの絶対位置を要求されているので、DGPS を使用することに

した。DGPS を行うには、自前で DGPS 固定局を設置し補正データを得るか、既設の DGPS 補正データ放送を利用するかである。我が国の沿岸 200km の範囲では、海上保安庁の中波ビーコン局から DGPS 補正情報が放送されている。幸いなことに、調査海域の沖縄県石垣島は、海上保安庁の中波ビーコン(宮古島局)によるディファレンシャル GPS (DGPS) 補正情報が容易に受信できるので、ビーコンによる DGPS 測位を採用した(図28)。

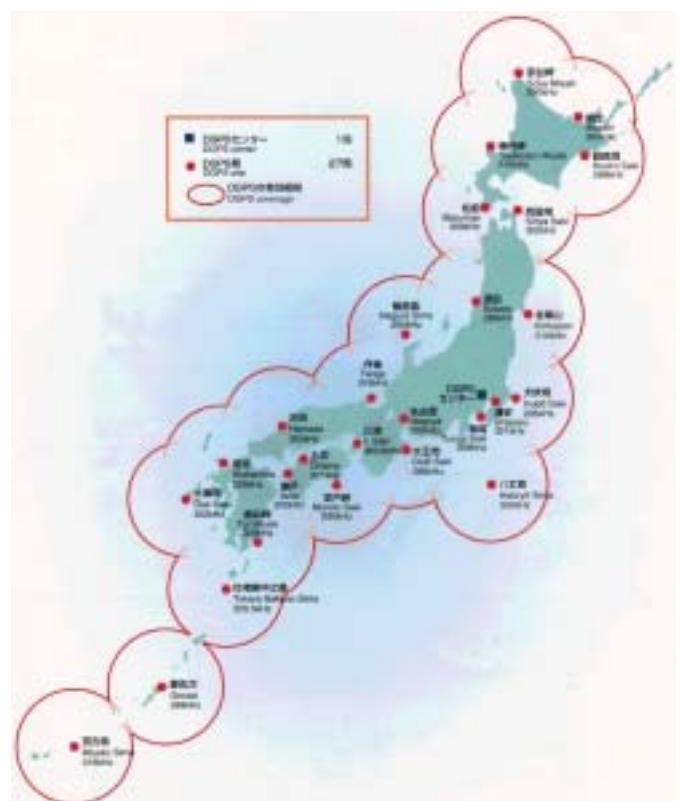


図28 日本における DGPS 中波ビーコン局の配置とサービスエリア  
(海上保安庁ホームページより引用)

本測位システムでは、ROV が海上へ浮上しているときは DGPS による測位を行い、ROV が水中にあるときは音響測位を行うこととした。

### 5-1-2 測位システムの構成

平成 12 年度は、LBL (Long Base Line) および SSBL (Super Short Base Line) の音響測位方式について試作し、現場実験を 2000 年 10 月末に石垣島の海岸(沖縄県石垣市伊土名)で行った。検討の結果、LBL が本観測システムの測位方式とし

てふさわしいことが明らかになった。LBL 検位システムは以下のコンポーネントから構成される。

#### トランスポンダ

小型のトランスポンダ 3 台を海中に係留する。受信周波数は 19~20kHz、応答周波数は 19kHz で、レンジの分解能は 10cm である。トランスポンダ間の距離（基線長）は最大 500m している。

#### 水中ユニット

ROV に装着する。トランスジューサ、音響高度計、深度センサ、デジタルコンパス、GPS 受信機等を備え、音波の送受信、レンジ測定、ROV の深度・高度測定を行う。データは ROV のテザーケーブルを介し船上ユニットに伝送される。

#### 船上ユニット

観測母船に設置する。水中ユニットからのデータを受信し、データ収録および位置の表示を行う。

測位の手順は、先ず、各トランスポンダの設置位置を DGPS で測定する。ROV を 3 つのトランスポンダで囲まれた範囲で遊泳させる、水中ユニットのトランスジューサ（送受波器）からコード化された 19~20kHz の質問信号が発せられると、海底設置された各トランスポンダは、質問信号を受信し 19kHz の返答信号を発信する。水中ユニットで各トランスポンダ毎の往復伝搬時間を計測し、船上ユニットに伝送し、ノートパソコン内でデータの記録および測位結果を表示する。同時に深度センサ、デジタルコンパス、音響高度計の測定データが船上ユニットに送られる。

### 5-1-3 検位システムの改良

2001 年度および 2002 年度は 2000 年度の現場実験で生じた問題点を解決すべく、以下のような測位装置の改良を行い、システムの実用化と測位精度の向上を図った。改良された LBL 検位システムの全景を図 29 に示した。

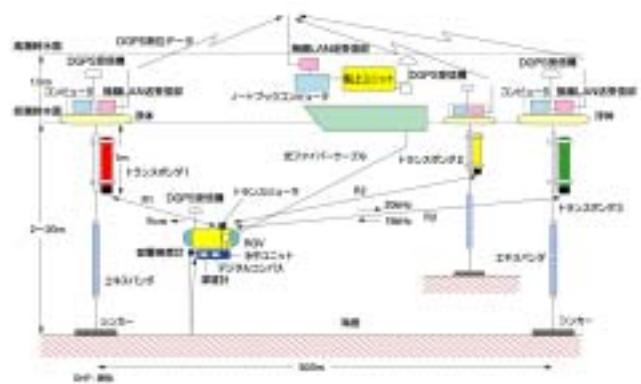


図 29 LBL 検位システムの全景

#### 潮汐の変動に対応したトランスポンダ係留方式の開発

石垣島沿岸では、潮位が 1 日で 1.5m 程度変動するので、トランスポンダの係留方法に工夫が必要である。また ROV とトランスポンダ間の見通しを確保する必要がある。そこでトランスポンダの設置方法を従来の海底係留から、トランスポンダを取り付けた浮体を海面に浮かべる方式とし、さらに、係留索として伸縮性のあるスプリングを使用し、海面レベルの変動にかかわらず、トランスポンダが常に海面付近に位置するようにした（図 29）。

#### トランスポンダの位置測定の自動化と高精度化

各トランスポンダ係留系の浮体に DGPS 受信機とデータ収録器を設置し、位置データの収録を行うと共に無線 LAN により、観測母船からリアルタイムでトランスポンダの位置情報を得ることができるようになった。これによりトランスポンダのキャリブレーションが不要となり、能率的な位置決定ができるようになった（図 30）。

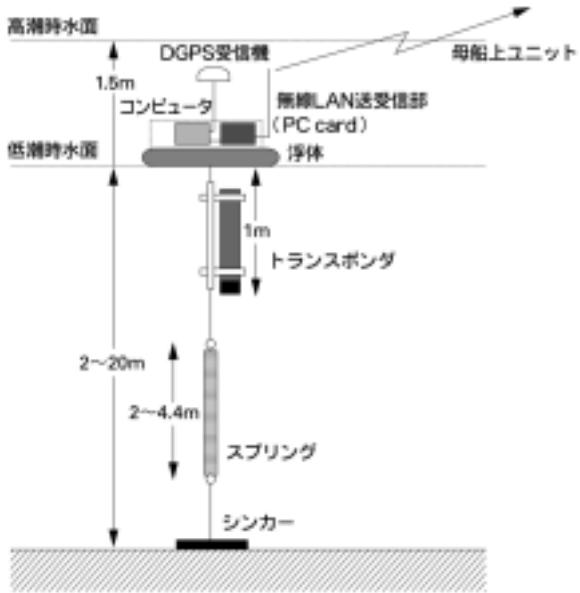


図30 改良したトランスポンダの係留方法

化はほとんどなく、塩分 32.2psi、水温 26.3°C程度で、計算された音速は 1534 m/s (Mackenzie の式) であった。また測位表示は、ROV の位置、深度、進行方向等の可視化、ビデオシステムの画像の測位画面へのスーパーインポーズ等が可能になった (図 31)。

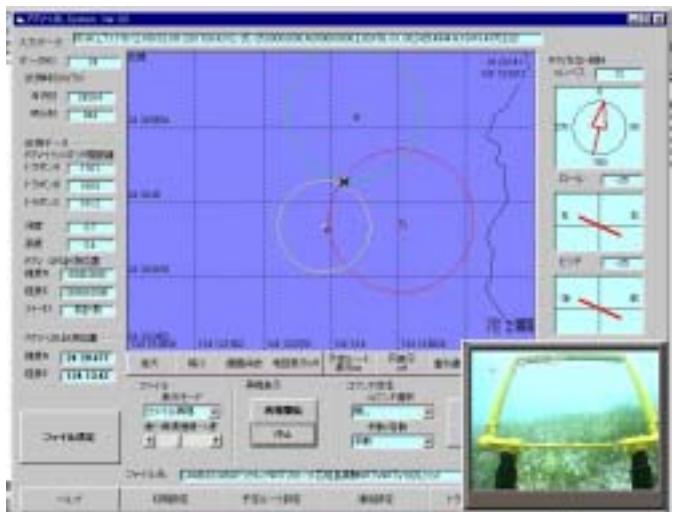


図31 水中走行ビデオシステムが取得した画像の測位画面へのスーパーインポーズ

#### 平成 14 年度の海域実験

平成 13 年度の現場実験で、平成 12 年度に生じた問題点はほぼ解決できた。しかしながら、トランスポンダ係留系の GPS データを伝送する無線 LAN が測位エリア内のどこでも安定した通信ができる状態に至っていない、GPS アンテナの取り付け位置が適正でない等の問題点があり、これらの改良を行い、現場実験を行った。

平成 14 年度の現場実験は、昨年度と同じ石垣島伊土名で行った。水深は 5m 前後である。3 台の浮体ートランスポンダ係留系を設置し、LBL による測位を行った。浮体上の GPS アンテナ、無線 LAN アンテナの海面からの高さは約 1m とし、可能な限り高くするようにした (図 32)。また、無線 LAN PC カードは電波伝搬実験をふまえ機種選定を行い、現場実験に適用した。浮体ートランスポンダの GPS 位置データは無線 LAN により母船上で安定に取得することができた。無線 LAN は、3 点のトランスポンダの設置範囲内ではどこでも安定した通信が行えた (図 33)。無線 LAN の通信距離は本実験では最大 500m 程度であった。また、水中ユニットとトランスポンダ間

#### 音速の測定

適切な音速値が与えられていないと LBL 測位の誤差の原因となる。塩分温度計を用い実験海域の塩分および水温の分布を測定し、音速を計算した。また、メモリ式塩分温度計をトランスポンダ係留系の浮体に設置し、塩分、水温の連続測定を行った。

#### 測位表示システムの改良

ROV の位置、深度、進行方向等を可視化し、実際の海草藻場調査に適用できるように測位表示システムの改良を行った。

#### 5-1-4 海域実験の概要

##### 平成 13 年度の海域実験

改良後の現場実験を 2001 年 10 月下旬に石垣島伊土名で行った。水深は 5m 前後である。トランスポンダの設置状況は概ね良好で、潮の干満を受けて係留系のスプリングが伸縮し、浮体は常に水面にあり、また浮体のドリフトを防止できた。浮体ートランスポンダ係留系の GPS 位置は無線 LAN により母船上で取得することができた。今回、現場実験を効率的に進めるため、水中ユニットは ROV に装着せず、実験用のフレームに搭載した。水中ユニットとトランスポンダの交信は概ね良好であった。実験海域において、水質計を使用し、塩分・水温を測定し、音速を求めた。塩分・水温とも深度による変

の音響交信は終始良好であった。測位表示例を図 33 に示す。



図 32 トランスポンダ係留系の浮体部分

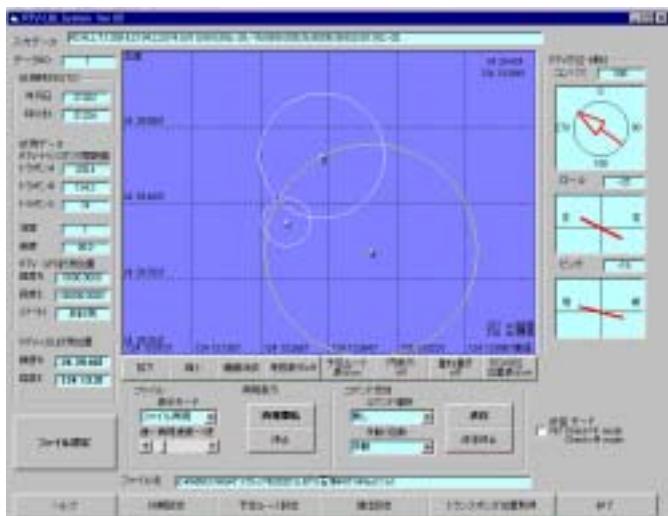


図 33 LBL 測位による表示結果（2002 年 10 月、沖縄県石垣島）

実験海域内において、水質計を使用し、塩分・水温を測定し、音速を求めた。塩分・水温とも深度による変化はほとんどなく、良く混合された状態を示していた。測定値は、塩分 32.0psu、水温 26.4°C 程度（2002 年 10 月 22 日）で、計算された音速は 1534 m/s (Mackenzie の式) であった。また、メモリ式塩分・温度計を浮体ートランスポンダ係留系に設置し、

海中の塩分・水温の連続測定を行った（図 34）。これにより、浮体を定点観測ステーションとして使用できることが明らかになった。

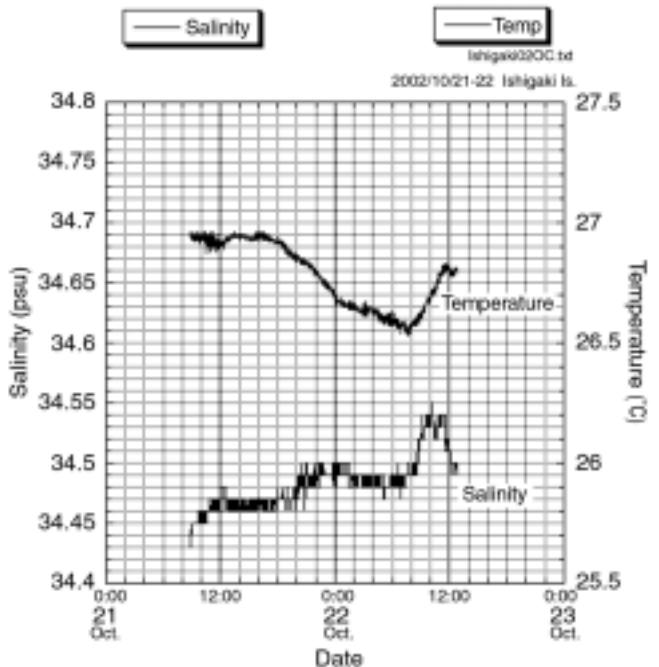


図 34 トランスポンダ係留系に設置した塩分・温度計の観測結果  
(トランスポンダ B に設置、海面下 50cm)

### 5-1-5 水中走行測位システムのまとめ

本研究では水深数 m から数 10m の浅海域を対象とした水中ビデオシステムのための水中走行測位システムを開発し、海域実験をおこなった。これにより今迄困難であった ROV の水中測位が可能になった。本測位システムで採用している LBL 測位においては、その測位範囲は水深の数倍の半径の海域とされているが、本システムでは水平距離に比べ水深が極端に浅い位置関係にある。その場合、音波のマルチパスが懸念されるが、ROV の送受波器とトランスポンダ間のレンジ測定において、音波の最初に到達した波のみを計測することにより、マルチパスの影響を回避した。現場測定によると、塩分および水温の鉛直方向の変化はほとんど無く、測位計算に一定の音速値を与えれば良いが、季節により鉛直方向の音速値の変化があれば、その補正が必要となる。トランスポンダの位置決定には、現在 DGPS (Differential GPS) を使用しているが、水中測位システムの高精度化（数 10cm 以下の精度）を追究す

ると、これを RTK-GPS など、より高精度な測位法に置き換える必要がある。

また本システムでは、浮体－トランスポンダ係留系、母船とのデータ通信に無線 LAN を採用した。これにより、ケーブル無しでリアルタイムのデータ通信が行えるようになり、調査の精度・能率の向上が図れた。今後、本測位システムと係留気球とを無線 LAN で結び、さらに、インターネットに接続すれば、画期的な調査システムが構築できる。また、浮体－トランスポンダ係留系は、リアルタイムのデータ収集機能および測位機能を備えた定点観測ステーションとして活用できることが示された。

## 6 水中走行ビデオシステムおよび統合測位システムの運用技術の研究開発

前章までに運用技術に関する研究開発成果についても一部で言及したが、ここでは本システムの実用化の観点から、具体的な運用技術の研究開発について改めて整理した。

### 6-1 運用方法の研究開発

調査海域における水中走行ビデオシステム、および係留気球からの画像と音響測位による総合測位システムの運用にあたり、以下のような作業手順、人員、調査船が実用上必要である。

#### 6-1-1 手順

- 1) 調査にあたり、観測基地、必要な物資（ヘリウムガスなど）の調達、傭船、観測地域までのアクセス、地図、航空写真、潮位図（図 35）などの情報入手を行う。
- 2) 調査日時は ROV の運用のし易さ（運用にはある程度の潮位が必要）と撮影に良好な条件を選ぶ必要がある。このため、潮位と太陽の位置（陽の高さ）を考えて決定する。調査期間には後述する ROV などの準備、片付けに要する期間を加える。
- 3) 飛行船や気球をあげるには、事前に航空管制官に届け出を行う。高度 300m 以上の場合には許可が必要となる。調査日当日は開始、終了の連絡を行う。
- 4) 調査日に間に合うように装置機材の搬送を行う。地域によっては直接、航空便で輸送できない場合があり、時間に余裕をみる必要がある。

5) ROV は調査日前日には組立てて、テストを行う。気球は格納庫があれば前日に、格納庫がない場合は当日に組立てて、調整を行う。図 36 に気球の組立作業の写真を示す。

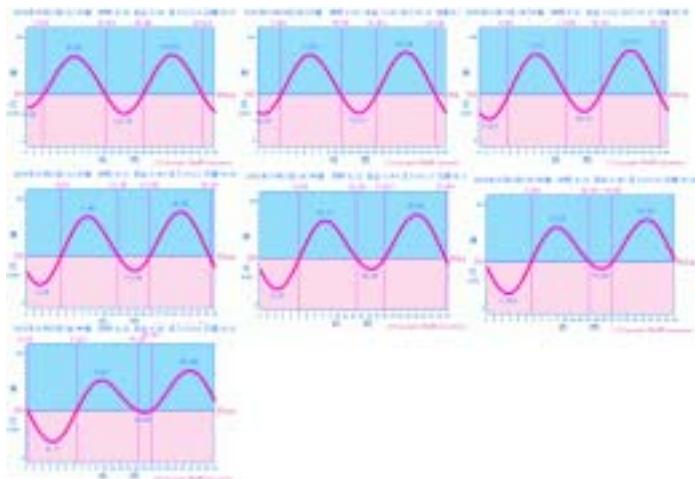


図 35 石垣島 2002 年 10 月 19 日から 25 日の潮位図  
(<http://ishigaki.com/> より入手)



(a) 気球を展開



(b) 気球へのヘリウムガスの注入



(c) カメラの取りつけ



(d) 調査船への積み込み

図 36 気球の組み立て作業

- 6) 調査は飛行船や気球により調査海域のマッピングを行い、事前に調査地点を決定する。航空写真があれば、それをもとに調査地点を決めることが可能であるが、地形や植生が変化している場合が多いので、新たに気球から写真撮影をして図 13、15、16 のようにマッピングしておくことが望ましい。
- 7) ROV、飛行船や気球の運用は当日の気象や海象をみて行う。特に、飛行船と気球は瞬間最大風速 10m/s 以上では運用困難であるので、余裕をみて作業を開始する必要がある。
- 8) ROV による観測は安全のため調査船のアンカーを打ってから行う。ただし、ROV と船の位置関係を把握して操縦できる場合、船を移動しながら ROV 観測を行うことができる。この方法は測線に沿った観測ができるので効率的であるが、ROV のケーブルを船のスクリューで巻き込むことのないよう細心

の注意が必要である。気球があげられる天候であれば、気球を同時に運用し、上空から ROV をモニターすることが望ましい。

9) 当日の観測終了後は観測データを整理し、ネットワークで転送する等により専門家の意見を聞き、翌日の調査内容を確認して調査を進めることが望ましい。図 37 に気球からのテレメータ画像を調査船上でモニターしている写真を示す。画像中央に調査船が映し出されている。

10) 調査終了後、ROV、気球の後かたづけを行う。次回観測のため真水での洗浄と乾燥を十分行い、機材を梱包・発送する。



図 37 気球からのテレメータ画像の調査船上でのモニター状況



図 38 低空の気球から撮影した調査船上の人員の配置状況

### 6-1-2 人員

船上での要員は 5 名、手順を踏めば陸上での作業も行うことができる。この人数で運用が可能である。以下にそれぞれの人員について記す。

- 1) ROV 関係 : ROV の組立や解体には 2 名の人員が必要である。観測時には ROV 操縦者とケーブル担当 2 名、計 3 名が必要である。ケーブル担当の 1 名は海象に詳しい人が望ましく、他の 1 名は ROV の投入時、回収時に必要であり、観測時には他の仕事をすることが可能である。ROV 操縦者は撮影対象物に詳しい人が望ましい。
- 2) 気球・測位関係 : 気球の準備には 3 名必要であるが、気球を上空にあげれば監視者は 1 名で良い。さらに、観測時においては、ROV の位置を監視（測位）を行う。
- 3) 監督 : ROV および気球などの運用全体を監督し、安全監視も行う。

図 38 に低空の気球から撮影した調査船上の人員の配置状況の例を示す。図中、気球の操作に 2 名が作業中であるが、ROV は船上に引き上げてあるので ROV 担当要員 3 名は作業を中断している。船上中央上の監督は気球からのテレメータ画像モニターを監視している。

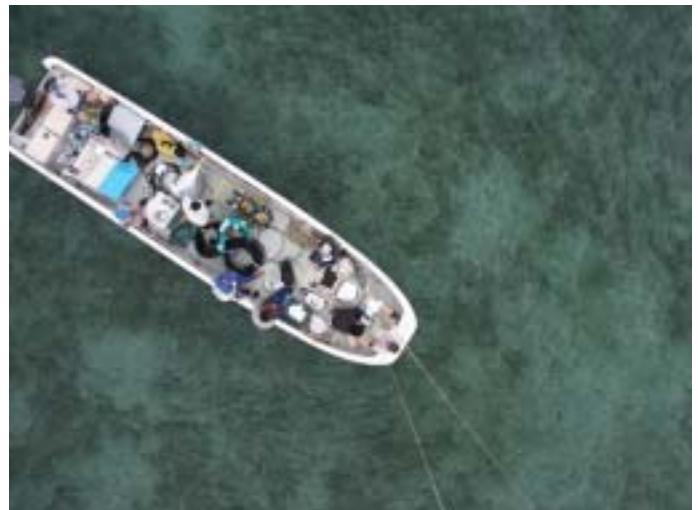


図 39 調査船上での各取機材の配置状況

### 6-1-3 調査船

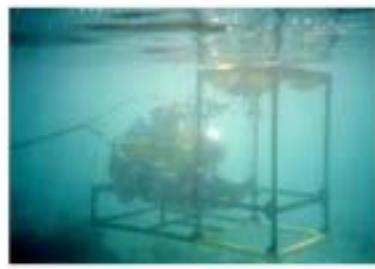
調査船は ROV 関係機材、測位関係機材と気球関係機材を配置できる大きさの船が必要である。さらに乗船する作業員の場所を確保しなければならない。このため、全長 8 メートル、幅 2 メートル以上の平底型の船が必要である。調査船上での各種機材の配置状況を図 39 に示す。機材の叢装は電源の確保、アースなどの安全面を考慮して行う。雨などの天候不良も考えられるので、その対策も施しておく。調査船は現地で傭船することになるため、船だけでなく船長の技量も含めて、事前調査を十分に行う必要がある。

## 6-2 運用技術のまとめと今後の問題点

前年度までは ROV を傾けた状態で撮影するのに熟練を要し

ていたが、最終年度の改造により、ボタン操作だけで 45 度に傾斜させることができとなり、一般ユーザーにも操作が容易となった。図 40 に平成 12 年度に開発した水中走行ビデオシ

ステムと、平成 14 年度に改良した水中走行ビデオシステムの運用中の写真を、図 41 に改良された水中走行ビデオシステムによる取得画像の一例を示す。



2000 年度開発した ROV の運用中の写真



2002 年度開発した ROV の運用中の写真

図 40 運用中の ROV

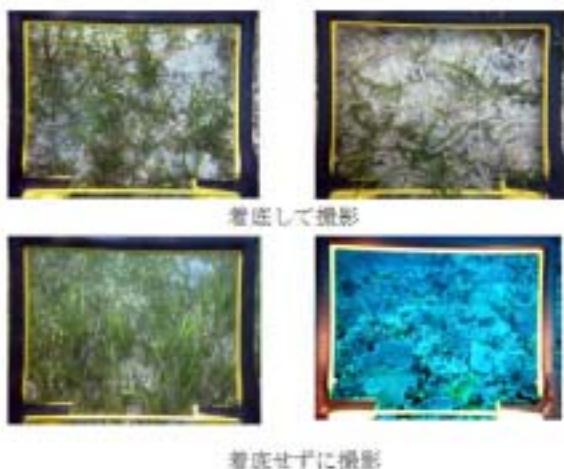


図 41 着底の有無による取得画像の差異

これらの結果、撮影用フレームを含む ROV の外寸が小型化され、船上作業が容易で、航空貨物としても搬送できるよう

になっただけではなく、水中での走行抵抗がほぼ半減した。実用性を高めるための部分的な改造点はあるものの、ROV を傾けて撮影してもブレなどは認められず、鮮明な画像を取得できた。このことから、本研究開発の水中走行ビデオシステムは基本的には完成したものと判断した。今後は一般ユーザーがより簡便に実運用海域にあうようにシステムを使用できる運用方法をさらに検討することが必要である。

水中走行測位システムおよび係留気球による統合測位システムの研究開発については、図 42 に示すように海水の透明度が高く浅い海域では、上空の係留気球により ROV の位置が小型船と一緒にデジタルカメラからのモニター画面においてリアルタイムで測位できた。図 42 では左下の白点が浮上中の ROV、左やや上の白点は遊泳中のダイバー、斜め下に伸びる白線は気球の係留索（ケブラー）、青黒い斑点は海草群集である。また、予め調査海域の上空からの画像を保有していないと、

小型船上の小さいモニター上での ROV の位置と画像撮影を予定したポイントを同定するのが難しいことがわかった。これに対し、深度があり海水の透明度が低い場合は光学的方法が使用できないので、音響測位方式が必要であることが分かった。



図 42 係留気球による ROV のモニター

また、浅海域では GPS による位置情報と海底の観測点の位置がほとんど一致するので、図 43 に示すように、ROV 航跡と海底画像をリンクさせる事が可能であり、海底状況の簡易 GIS システムとしても活用できることがわかった。これに対し、深度があり海水の透明度が低い場合は GPS や光学的方法が使用できないので、音響測位方式が必要である。

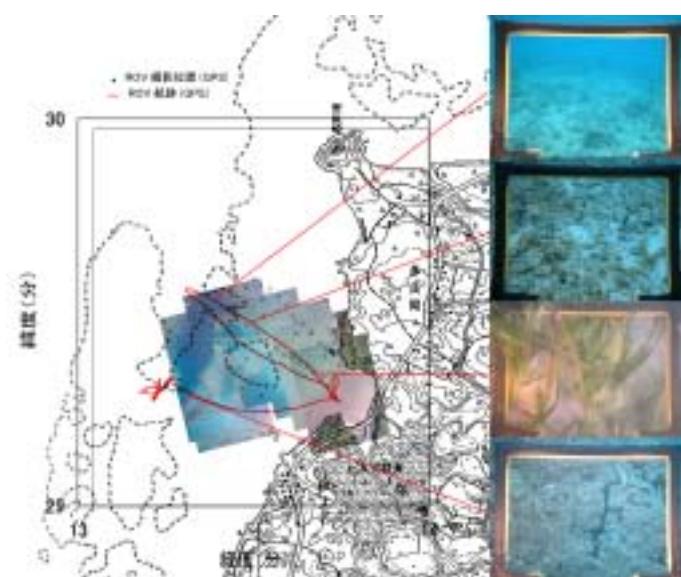


図 43 地図情報上にオーバーレイした ROV 航跡と海底画像

被覆度の解析については、市販のリモートセンシングソフトをデジタルカメラ画像でも処理できるように改造して、衛星画像、航空写真、気球搭載カメラ画像、ROV 搭載カメラ画像を同一ソフトで一元的に処理することにより、一般のユーザーにも使用できる条件を整えた。ただし、厳密な海草藻場の評価手法は対象点の現存量を坪刈りにより求めるのに対し、本研究での研究開発では対象地点を上方からモニターする事により被覆度を求める事を主眼としている。ROV を用いたモニタリングシステムで被覆度だけでなく水中部分の現存量の推定にも使用する場合には、3 次元的な画像の取得など、光学的に推定する手法を検討するべきである。

水中走行ビデオシステムおよび統合測位システムの運用技術全般については、基本的には実用可能な段階に到達したと考えられる。このシステムを運用した場合、上空からの気球によるマッピングは気球の高度やカメラなどの条件にもよるが約 2 時間で約  $3\text{km}^2$  を観測可能である。また、本システムによる観測では 1 測線中の間隔幅や面積にもよるが、500m の測線を 50m 間隔で観測した場合、約 3 時間でかなり詳細な観察が行える。単純に比較することはできないが、従来法のダイバーによる観察では専門知識を有したダイバー、補助ダイバーと監督の 3 名によるチームで 1 日 1~2 測線程度である。ダイバーによる 25m 以深の深場の作業や潮の流れの強い地点での調査では作業時間や安全性の面で制約を受けるが、本システムでは問題とならない。作業時間の短縮（作業効率）のみならず、調査海域の拡大や作業要員の安全性などから、本システムの評価手法は極めて有効である。

さらに、今後の実運用を考慮して、係留気球で上方から対象地域の海面・海底の画像を取得し、これをリモートセンシングソフトにより解析して被度分類を行うことに成功した。これにより、とりあえずは海面・海底の画像を用いた被覆分類だけで GIS 化は可能であり、分類した該当部分の面積を海草の被覆度として計算するプログラムの完成により、被覆度の等值線なども将来的に描画できる可能性がある。

係留気球で上方から対象地域の画像を取得することにより、従来は航空写真でしか得られなかつた高分解能の画像を容易に取得できる見通しが得られた。係留気球は運用高度が低いので、曇天でも雲による障害のない良好な画像が得られること、また係留気球の運用の簡便さを考慮すれば、遠隔地・離

島の海草藻場の調査には非常に適した手法である。

## 7 種類の判別や既存手法との互換性等の検討

これまで述べてきたシステムが実用化すれば、調査海域に出現する海草類の分布状況を正確に地図上に描くことができる。特に、採集や潜水作業を伴わない調査手法であることから、環境やジュゴン等の希少生物に与える影響が少なく、調査に熟練者を必要としない、などといった大きな利点がある。しかし種類別のマッピングとなると、ある程度の経験と予備知識が必要である。各種の形態や生態等については、いくつかの同定の手引きとなる総説（例えば、笠原 1997、当真 1999）があるので、ここでは、主として石垣島周辺における調査結果から海草類の分布状況について整理した。

温帯域に分布する代表的な海草であるアマモ (*Zostera marina*) は、春から初夏にかけて繁茂し、盛夏から冬には地上部の大部分が消失することが知られている（新崎 1950）。しかしながら、我が国の亜熱帯海草類については周年にわたって調査した例が極めて少ないため（横地 2002）、季節的変化に関する知見はほとんどない。もし、季節的な変化があるとすれば、調査計画の策定に際し十分な考慮が必要である。そこで、本研究では、通常用いられる坪刈りによる現存量調査に加えて、現存量の季節変化の傾向を敏感に捉えるため、地上部の長さを周年にわたって測定した。また画像から現存量を推測する手掛かりとなる、いくつかの画像と現存量の実測例を示した。

### 7-1 調査方法

調査した場所は、平成 12 年度は石垣島沿岸の 4 海域（吹通川河口地先、伊野田、白保および名蔵湾 2 カ所、図 44）で、岸から沖に向かってほぼ垂直に測線を設け、海草類が分布するおおよその範囲を把握した上で 2、3 点の調査定点を設定し、GPS を使って、毎回同じ地点に到達できるようにした。そして、名蔵湾の 1 定点ではほぼ毎月、他の定点では年 4 回、出現種の記録と優占種の地上部の長さ（上位 30 本（= シュート）の平均）を測定した。加えて名蔵湾の 1 定点では、年 4 回、25X25cm の坪刈りを各 3 回行った。平成 13~14 年度は、平成 12 年度の予備調査により、実験海域として選定した吹通川河口地先に設けた 3 定点において 1 年間にわたってほぼ毎

月、ウミヒルモを除く全出現種の地上部長（上位 30 本の平均）を測定し、年 4 回、25X25cm（沖側定点）または 50X50cm（中間定点）の坪刈りを 2~4 回行った。さらに、石垣島の新川地先、竹富島西、竹富島東にも各 1 定点を設け、年 4 回、出現種の記録と地上部長の測定を行った（図 44）。石垣島周辺の 5 つの調査海域の環境に関する概要を表 1 に示した。さらに、平成 14 年 3 月と 15 年 1 月には、ウミヒルモ属 2 種それぞれの純群落が確認されている慶良間列島阿嘉島周辺で、ウミヒルモ類を中心とした海草類の分布状況を調査した。



図 44 海草藻場調査地

表 1 : 石垣島周辺の 5 調査定点の種類データ

|          | 名蔵 (半側面) | 吹通 (半側面) | 新川    | 伊野田  | 竹富西  |
|----------|----------|----------|-------|------|------|
| 平均水深 (m) | 1.2      | 1.2      | 1.6   | 1.5  | 3    |
| 最高水温 (℃) | 36.3     | 35.4     | 34.4  | 32.7 | 31.8 |
| 最低水温 (℃) | 14.3     | 11.7     | 14.7  | 16.6 | 17.4 |
| 最高潮位     | 34.8     | 36.1     | 35.6  | 35.2 | 35.6 |
| 最低潮位     | 16.2     | 16.2     | *14.4 | 20.1 | 22.5 |

\* : センサーへの生物付着によるエラーの可能性がある。

本調査においては、海草類の地上部と地下部を次のように定義した。すなわち基本的には葉鞘と地下茎の境目から上を地上部、下を地下部とし、境目よりも上から根が出ている場合には、そこを境界にした。実際の調査においては、調査定点の周囲で草丈の長そうな場所数カ所をスコップで掘り返し、地下茎と共にナイロンメッシュ製の袋に 1 袋分（湿重量約 1kg）を採集して研究所に持ち帰り、種類ごとに地上部長の長いものから 30 本のシートを測定して平均を求めた。ただし、

ウミショウブの地上部の長さについては、採集量が膨大になるため、例外的に海底面から最も長い葉の先端までの高さとし、海中で測定を行った。現存量は、坪刈りによる採集物を種ごとに地上部と地下部を分け、110°Cで 24~72 時間乾燥した後、室温に戻して重量を測定した。

## 7-2 結果と考察

### 7-2-1 海草類の分布状況

石垣島周辺海域における海草類の出現種と分布について表2に示す。

圖 2：石門萬丹庄？地點紀念碑名稱標示說明板況<sup>10</sup>

日本の亜熱帯海域には7属 10種の海草類が知られており、八重山海域ではこのうちの9種の分布が確認されていた（横地 2002）。今回の調査では、吹通川河口地先でのみ、この9種全てが出現したことから、プロジェクトの実験海域として吹通地先海域を選定した。

種類ごとに見ると、リュウキュウスガモとウミジグサは7つの調査地全てで出現し（表2）、特にリュウキュウスガモは多くの場所で優占種となっていた。本種は多くの場合、リュウキュウアマモやベニアマモと共に混生するが（図45）、これら3種の葉部はストラップ状でよく似ており、画像のみで正確に種を判別するのは不可能であると判断された。このため、本システムでは、種類別に被覆度を求めるのは困難であると考えられた。一方、ウミジグサは小型種で、多くの場所に出現したが、たいていは他種の下草となり目立たない。竹富西の調査地でのみ、本種がほぼ純群落を形成していた（図46）。

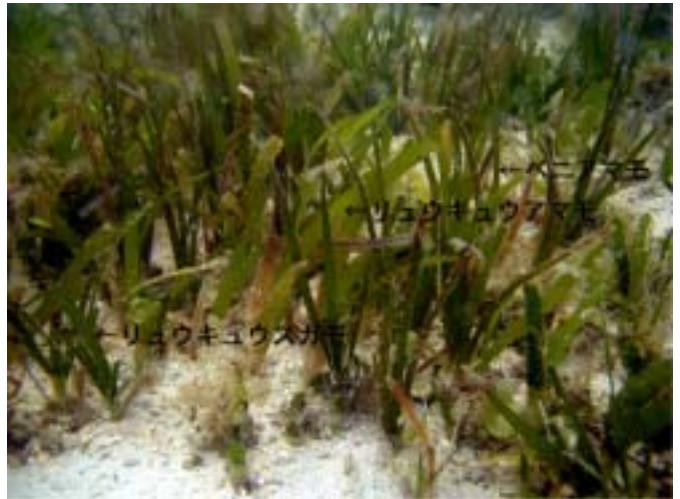


図45 リュウキュウスガモ、リュウキュウアマモ、ベニアマモの  
混生群落（名蔵湾）



図 46 ウミジグサほぼ單一種からなる群落（竹富西）

特定の地点にしか出現しなかった種類としては、ウミショウブは吹通地先のみ、コアマモとマツバウミジグサは吹通と名蔵の岸側定点でのみ確認された。ウミショウブは我が国の亜熱帶性海草では唯一の大型種で、八重山海域が北限とされている。吹通の中間定点ではほぼ純群落を形成し、沖側定点では他の6種と混在していた。マツバウミジグサとコアマモは、干潮時に長時間干出する砂泥質の場所でのみ見られた。リュウキュウスガモ、ウミショウブ、ウミジグサ、マツバウミジグサ、コアマモは、単独で群落を形成することがあるのに対して、リュウキュウアマモ、ベニアマモ、ボウバアマモの3種は、他種と混生する状況でのみ見られた。

今回観察された9種の海草類は周年にわたって観察され、

後述するように、季節的な消長を繰り返すことはないと考えられた（表 2において「見られないときがあった (+/-) 」としたものは、観察した範囲が毎回同一ではなかったことに起因するもので、分布密度が低いことを示している）。

阿嘉島では、石垣島周辺の 7 地点では確認されなかったヒメウミヒルモ (*Halophila decipiens*) を含む 5 種の海草類を直接確認した。ヒメウミヒルモは比較的最近、我が国での分布が報告された種で (Kuo et al. 1995) 、沖縄本島の一部と瀬底島でのみで確認されていた（ごく最近、石垣島浦底湾での分布を確認した）。阿嘉島では水深 32m の砂質底に純群落を形成しており（図 47）、本群落が少なくとも 1992 年から存在することが阿嘉島臨海研究所収蔵の標本から明らかになった。

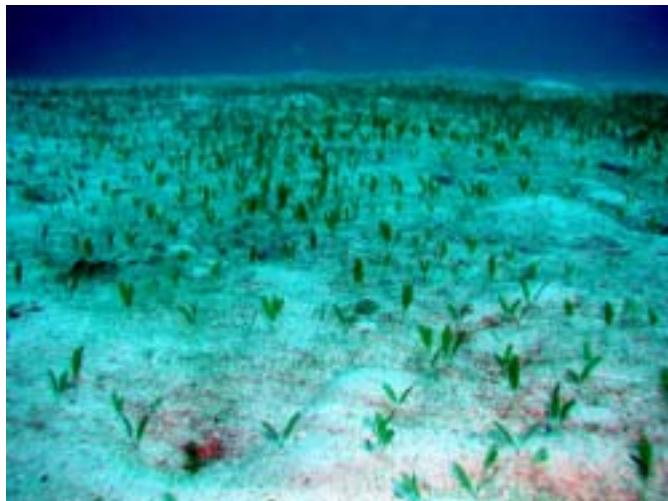


図 47 水深 32m の海底に広がるヒメウミヒルモの純群落

（阿嘉島サクバル沖）

阿嘉島ではウミヒルモも主として純群落として存在した。しかし、その単一種の群落の中に、形態的にいくつかの型が認識された。まず、葉の中軸に沿って顕著な暗紫色の部分が見られ、垂直地下茎も紫色を帯びている型が見られた（図 48）。また、同じ場所で葉の長さが 6~8mm 程度と、普通に見られるものより明らかに小さい型も認められた。これらが遺伝的な差異によるものか、生息環境によるものか、興味深い。ウミヒルモ類は世界的にも広い分布を持ち、アオウミガメやジュゴン等の餌としても重要であることが知られている。今後、その保護や造成を図る上でも、分類上の整理が必要である。

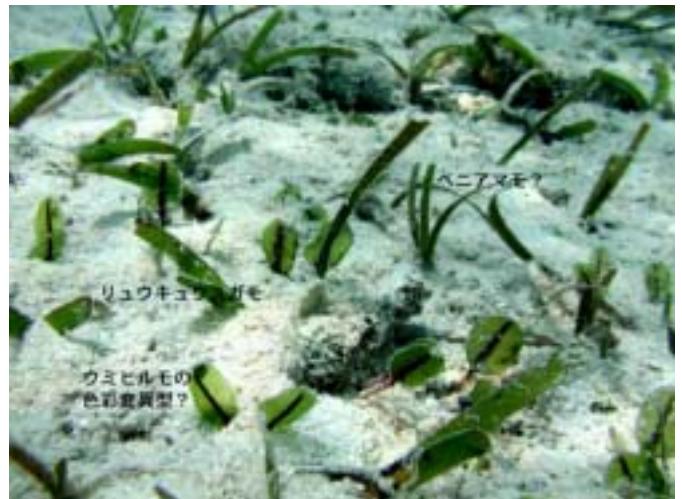


図 48 リュウキュウスガモ等と混生するウミヒルモの色彩変異型?  
(阿嘉島マエノハマ)

## 7-2-2 海草類の現存量

### 地上部と地下部の比

名蔵湾の定点付近の海草藻場は、リュウキュウスガモとリュウキュウアマモ、ベニアマモの 3 種でほぼ占められており、その地下部までを含めた現存量（乾燥重量）は、年 4 回、全 12 コドラートの平均値から 1 m<sup>2</sup>あたり 555 g (標準偏差 128.5) と計算された。このうちリュウキュウスガモが全体の 66% を占めていたが、本種の現存量は地下部が中心であった。地上部と地下部の比を較べたところ、本種では地上部 1 に対して地下部は 2.27 倍と最も大きく、全現存量のうち地下部が約 70% を占めていた。リュウキュウアマモがこれに次いで 1.57 倍であったが、ベニアマモについては 0.52 倍と地下部よりも地上部の方が大きかった（図 49）。このように、地上部に対する地下部の比は、同所的に出現し、形態的にも類似している 3 種間においても大きく異なっており、地上部の現存量（被覆度）から地下部の現存量を推定することは困難であると判断された。

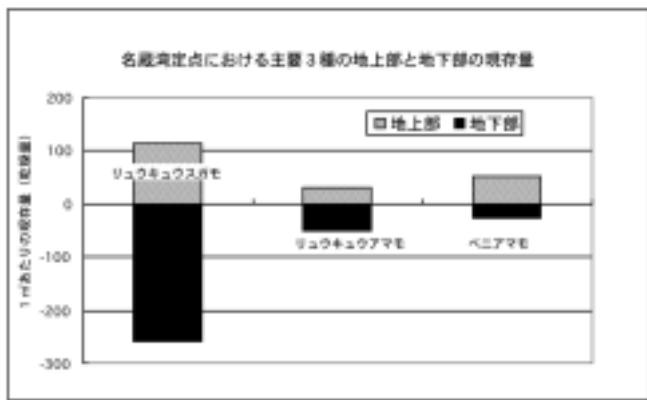


図 49 名藏湾中間点におけるリュウキュウスガモ、リュウキュウアマモ、ベニアマモの地上部と地下部の現存量

吹通地先の沖側定点では、リュウキュウスガモとリュウキュウアマモ、ベニアマモの3種に加えて、ボウバアマモ、ウミジグサなどが混生していたが、1 m<sup>2</sup>あたりの地下部を含めた現存量は1年間の平均値（n=11）で498 g（標準偏差198.7）と、名藏湾の定点と大きな差はなかった。しかし、大型種のウミショウブが卓越する中間定点では、1 m<sup>2</sup>あたりの平均現存量（n=14）は1073 g（標準偏差347.7）となり、種構成によっては単位面積あたりの現存量が大きく異なることが明らかになった。

#### 画像と地上部現存量の対比

現存量調査の坪刈りでは、水中走行ビデオシステムの取得画像からおよその現存量を把握するために、一部、ROVの枠と同大のコドラーで静止画像の取得と地上部現存量（乾燥重量）の測定を行った（図50）。これらの写真を見ても明らかのように、亜熱帯の種多様性に富む海草群集においては、構成種によって群集の立体的な構造が大きく異なり、このことが、画像による現存量の推定を著しく困難にしている。例えば、図50Aでは、ウミショウブの長い葉がレンズ近くまで達し、大きな視野を占めるため、他の場所では中心的な構成種となっているリュウキュウスガモやリュウキュウアマモがほとんど隠れてしまっている。また、図50Cと図50Dは、被度としては大差ないように見えるが、現存量では約2倍の差があった。これも種構成の違いに起因していると思われる。このように、現状では画像から現存量を精度良く推定することは困難であるが、将来的には、造礁サンゴ等に適用されているステレオ画像から立体構造を把握する手法を取り入れるなどして、地上部現存量の推定ができる可能性もある。

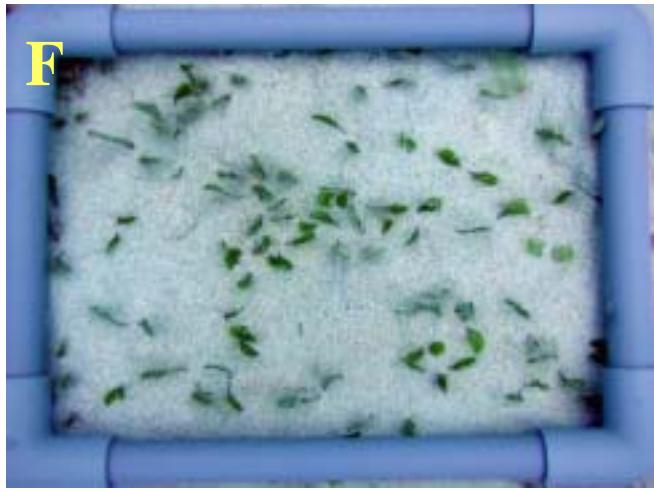
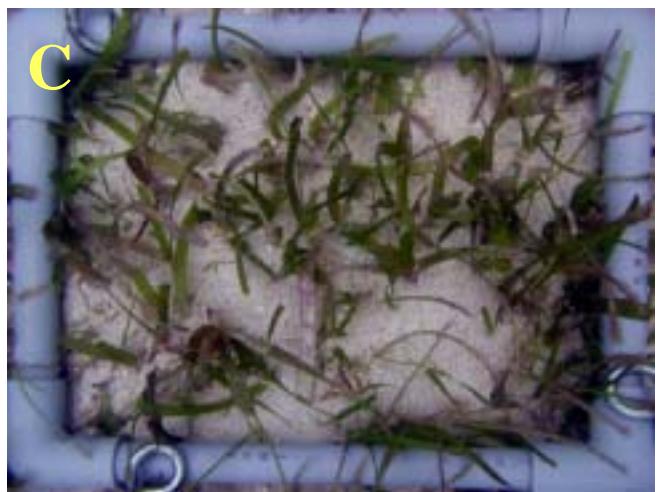


図 50 A～F： ROV 撮影枠と同大のコドラーートの画像と地上部現存量の対比。 A と B は改良前 ROV の撮影枠 (570×415mm) 、 C から F は改良後の ROV の撮影枠 (285×208mm) と同大。 A; 2002/08/07 吹通中間定点のウミショウブ群落、 B; 2001/07/10 吹通沖側定点の多種混生群落、 C; 2001/11/07 吹通沖側定点の多種混生群落、 D; 2001/12/07 吹通沖側定点付近のリュウキュウアマモ群落、 E; 2002/02/12 竹富西のウミジグサ群落、 F; 2002/03/03 阿嘉島マジャノハマのウミヒルモ群落。

## 現存量の季節変化

坪刈りによる現存量調査は、後述するように季節変化の把握には不向きであると考えられたことから、本研究では地上部の長さの変化を周年にわたって調査した。平成 12 年度に報告した名藏湾における主要 3 種（リュウキュウスガモ、リュウキュウアマモ、ベニアマモ）の地上部長の変化幅は、いずれも 1.7 倍以内で、季節的変化の傾向は不明瞭なもの夏季に大きくなる傾向が見られた（図 51）。平成 13 年度の吹通沖側定点におけるこれら 3 種の地上部長の変化は、やはり 1.7 ~1.8 倍であり、明瞭な季節的変化の傾向は見いだし難かつた（図 52）。また、ウミジグサと潮間帯の 2 種（マツバウミジグサとコアマモ）についても季節変化は必ずしも明瞭ではなかったが、夏季に長く冬季に短くなる傾向が見られた。



図 51 名藏湾中間定点におけるリュウキュウスガモ、リュウキュウアマモ、ベニアマモの地上部長の季節変化

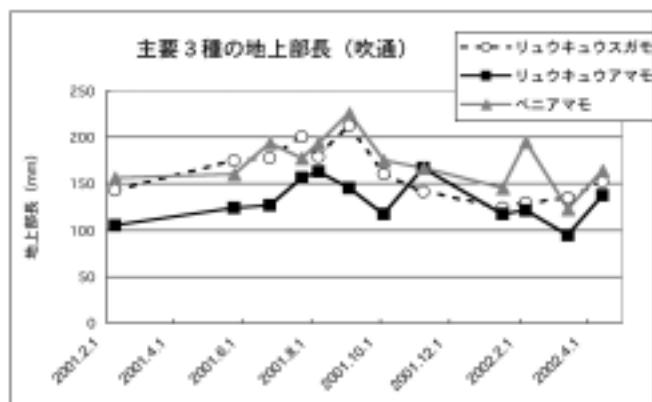


図 52 吹通沖側定点におけるリュウキュウスガモ、リュウキュウアマモ、ベニアマモの地上部長の季節変化

これに対して、地上部長の季節変化が明瞭に現れた種もあった。最も顕著だったのは、吹通中間定点におけるウミショ

ウブで、9 月に最大値 106cm、2 ~ 3 月に最小値 26cm となり、約 4 倍の変化が観察された（図 53）。

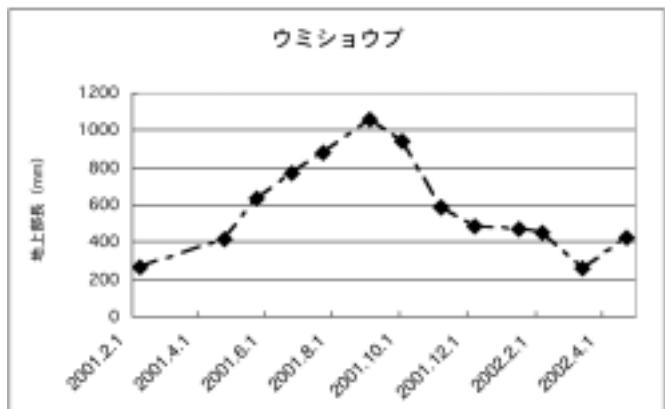


図 53 吹通中間定点におけるウミショウブの地上部長の季節変化

ウミショウブに次いで明瞭な季節変化を示したのは吹通沖側定点のボウバアマモで、8 月に 22cm、3 月に 10cm と 2.2 倍の変化が記録された（図 54）。本種は伊野田においても同様の変化を示したが、竹富東においては季節的な変化が見られなかった。このように、地上部長の季節変化の現れ方は同じ種であっても生息環境によって異なる可能性がある。

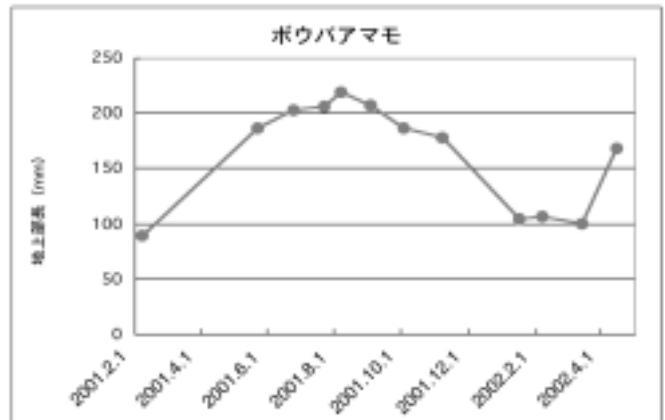


図 54 吹通沖側定点におけるボウバアマモの地上部長の季節変化

海草類の葉は葉鞘に保護された成長点から伸長し、先端部から枯れてくる。従って、地上部長は葉の成長ならびに枯死速度によって決まると考えられ（今回の調査では、葉の状態から食害による影響は大きくないと思われた）、水温や光の量が関係するものと推測される。特に、ウミショウブは石垣島を北限とする熱帯種であり（横地 2002）、ボウバアマモは干出に弱いことが指摘されていることから（den Hartog 1970）、特に吹通地先において顕著な季節変化が見られたのは、冬季

の夜間に潮位が大きく低下することによる干出、または水温の極端な低下が季節変化の主たる原因と考えられる。そして、場所によって季節変化の様相が異なるのは、水深や海水交換率、卓越風といった地形的条件が関係していると考えられる。

地上部の長さの季節変化が最も大きかったウミショウブについて、地上部と地下部の現存量の関係を図 55 に示した。地下部に対する地上部の割合が夏と冬では大きく異なることが予想されたが、実際には季節性は認められなかった。これは、最長の葉の長さのみを上位から測定したため、その群集全体の地上部長の平均とはなっていないことや、地下部の現存量に対して葉 1 枚の重量が非常に小さいために、変化が誤差に埋もれてしまったためと考えられる。いずれにしても、従来から多用されている坪刈りによる現存量調査ではコドラー 1 毎のバラツキが大きく、季節的変化は見過ごされてしまう可能性があることが分かった。

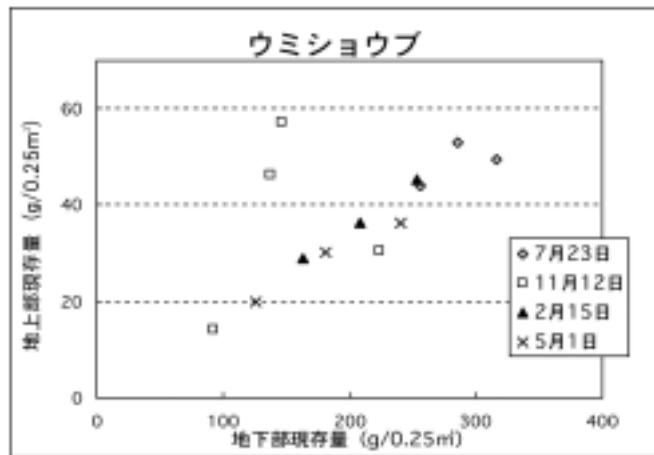


図 55 吹通中間定点におけるウミショウブの地上部現存量と地下部現存量の関係

吹通の沖側定点は、今回の調査地の中で最も海草類の多様度が高い海域であるが、その景観は季節的に大きく変化した（図 56）。これは、季節変化が著しいウミショウブとボウバアマモの存在によるものと考えられるが、調査回数が少なく、かつ個人間での誤差が大きい目視による従来法での調査を行った場合には、その場所の海草群落の構成や現存量等の評価が偏ったものになる可能性を示していると言える。また、モニタリング調査で経年変化を把握する場合にも、調査時期の異なるデータを比較することは避けるべきであろう。従って、

海草藻場の評価においては、調査の実施時期の選定に十分な考慮を払う必要があるとともに、目視などの主観に左右される調査法は問題が大きいことが明らかになった。



図 56 吹通沖側定点付近の景観（上：2001 年 7 月、下：2002 年 2 月）

## 8 引用文献

- den Hartog C (1970) The seagrasses of the world . North-Holland Pub. Co. Amsterdam, 257pp.
- 笠原 勉 (1997) 琉球列島産の海草の形態と生態及び移植手法について. 月刊海洋 29 : 466-474
- Kuo J, Kanamoto Z, Toma T, Nishihira M (1995) Occurrence of *Halophila decipiens* Ostenfeld (Hydrocharitaceae) in Okinawa Island, Japan. Aquatic Botany 51:329-334.
- 新崎繁敏 (1950) アマモ、コアマモの生態 (I) . 日本水産学会誌 15 : 567-572.
- 当真 武 (1999) 琉球列島の海草—I. 種類と分布. 沖縄生物

学会誌 37 : 75-92.

横地洋之 (2002) 琉球列島の海草群落. 中森亨編、日本におけるサンゴ礁研究 I. 日本サンゴ礁学会, pp21-27.

## 9 研究発表

(誌上発表)

梅沢 有・宮島利宏・山室真澄・茅根 創・小池勲夫:熱帯・亜熱帯沿岸域における陸源窒素影響域の解析-底生大型藻類の $\delta^{15}\text{N}$ の利用-. 月刊海洋, 33, 472-476, 2001年7月

西村 昭・山室真澄:概説 (海洋湖沼調査法). 産業技術総合研究所地質調査総合センター総編集、今井 登・遠藤祐二・村上 裕 編集, 地質学ハンドブック, 572-573, 朝倉書店, 2001年9月

西村清和・石原丈実:位置決定 (海洋湖沼調査法). 産業技術総合研究所地質調査総合センター総編集、今井 登・遠藤祐二・村上 裕 編集, 地質学ハンドブック, 573-580, 朝倉書店, 2001年9月

Yamamuro, M., Umezawa, Y., and Koike, I.: Seasonality in nutrient concentrations and stable isotope ratios of *Halophila ovalis* growing on the intertidal flat of SW Thailand. Limnology 2, 199-205, December 2001

Umezawa, Y., Miyajima, T., Yamamuro, M., Kayanne, H. and Koike, I.: Fine scale mapping of land-derived nitrogen in coral reefs by  $\delta^{15}\text{N}$  in macroalgae. Limnology and Oceanography, 47 (5), 1405-1416, October 2002

西村清和・山室真澄・野崎 健・根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・清水弘文・林原 育・村上英幸:Development of a shallow-sea underwater positioning system and application to an observation system for subtropical seagrass beds, Techno-Ocean 2002 International Symposium Proceedings, P-4, 2002年11月

山室真澄・西村清和・岸本清行・野崎 健・加藤 健・根岸 明・大谷謙仁・清水弘文・林原 育・佐野元彦・玉城泉也・福岡弘紀: Mapping subtropical seagrass beds using underwater remotely operated vehicle(ROV) and small aircraft. Techno-Ocean 2002 International Symposium Proceedings, 2002年11月

西村清和: 浅海域の水中測位システムー亜熱帯海域海草藻場

観測システムへの適用ー.I 超音波 TECNO, 日本工業出版, Vol. 15, No1, 2003年1月.

Yamamuro, M., Yamano, H. and Kayanne, H.:  $\delta^{15}\text{N}$  of seagrass leaves for monitoring anthropogenic nutrient increases in coral reef ecosystems. Marine Pollution Bulletin, 46, 452-458, 2003年4月

(口頭発表)

大谷謙仁・根岸 明・加藤 健・野崎 健・山室真澄・西村清和・岸本清行・皆川 恵・林原 育・佐野元彦・玉城泉也:海草藻場の評価手法に関する研究ー水中走行ビデオシステムー. 日本サンゴ礁学会第3回大会, 東京, 2000年9月

西村清和・山室真澄・岸本清行・野崎 健・加藤 健・根岸 明・大谷謙仁: 浅海域の水中測位システムー亜熱帯海域における海草藻場観測システムへの適用ー. 海洋理工学会, 東京, 2001年5月

大谷謙仁・山室真澄・野崎 健・根岸 明・加藤 健・西村清和・林原 育・清水弘文・佐野元彦・玉城泉也: ROV モニタリングシステムによるサンゴ礁藻場の画像解析. 日本サンゴ礁学会第4回大会, 琉球大学, 2001年11月

山室真澄・大谷謙仁・加藤 健・西村清和・根岸 明・野崎 健・佐野元彦・清水弘文・玉城泉也・林原 育・福岡弘紀: ROV を用いた亜熱帯海草藻場分布調査システムの開発. 第36回日本水環境学会年会, 岡山大学, 2002年3月

佐野元彦・山室真澄・成島いずみ・福岡弘紀・林原 育・玉城泉也・清水弘文: 石垣島名蔵湾海草藻場で採集された魚類の安定同位対比. 2002(平成14)年度日本水産学会大会 奈良(近畿大学), 2002年4月

林原 育・清水弘文・佐野元彦・玉城泉也・福岡弘紀・皆川 恵・山室真澄・西村清和・野崎 健・加藤 健・根岸 明・大谷謙仁: 石垣島周辺沿岸域における海草類の出現状況と名蔵湾・吹通川地先での主要種の地上部長の季節的変化. 沖縄生物学会第39回大会, 宜野湾(沖縄国際大学), 2002年5月

西村清和・山室真澄・野崎 健・根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・清水弘文・林原 育・村上 英幸: 浅海域の水中測位システム(その2)ー亜熱帯海域海草藻場観測システムへの

適用と改良－，海洋理工学会海洋理工学会平成 14 年度春季大会，東京，2002 年 5 月。

山室真澄・西村清和・岸本清行・野崎 健・加藤 健・根岸 明・  
大谷 謙仁・清水弘文・林原 育・佐野元彦・玉城泉也・  
福岡弘紀：Mapping tropical seagrass beds using  
underwater remotely operated vehicle (ROV). Pacific  
Congress on Marine Science and Technology  
International (PACOM)，幕張メッセ国際会議場，2002 年  
7 月

山室真澄・西村清和・岸本清行・野崎 健・加藤 健・根岸 明・  
大谷謙仁・清水弘文・林原 育・佐野元彦・玉城泉也・福  
岡弘紀：Mapping subtropical seagrass beds using  
underwater remotely operated vehicle (ROV) and small  
aircraft. Techno-Ocean 2002 International Symposium  
Proceedings，2002 年 11 月

加藤 健・大谷謙仁・野崎 健・根岸 明・山室真澄・西村清和・  
林原 育・清水弘文・玉城泉也：繫留気球によるサンゴ礁  
のモニタリング，日本サンゴ礁学会第 5 回大会，東京工  
業大学，2002 年 11 月

(ポスター発表)

西村清和・山室真澄・野崎 健・根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・  
清水弘文・林原 育・村上英幸：Development of a  
shallow-sea underwater positioning system and  
application to an observation system for subtropical  
seagrass beds, Techno-Ocean 2002 International  
Symposium, Kobe, 2002 年 11 月

田中義幸・仲岡雅裕・林原 育：熱帶性海草 3 種の光合成特性  
と地上部・地下部の生物量. 日本サンゴ礁学会第 5 回大  
会、東京工業大学，2002 年 11 月

野崎 健・根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・山室真澄・西村清和・  
林原 育・清水弘文・玉城泉也・波利井佐紀：水中ディジ  
タルカメラ画像および繫留気球搭載ディジタルカメラ画  
像の簡易処理，日本サンゴ礁学会第 5 回大会，東京工  
業大学，2002 年 11 月

大谷謙仁・野崎 健・根岸 明・加藤 健・山室真澄・西村清和・

林原 育・清水弘文・玉城泉也：リモセンソフトを用いる  
ディジタルカメラ画像の処理，日本サンゴ礁学会第 5 回  
大会，東京工業大学，2002 年 11 月

根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・野崎 健・山室真澄・西村清和・  
林原 育・清水弘文・玉城泉也：サンゴ礁海草藻場観測用  
水中走行ビデオシステム (ROV) の改良と運用，日本  
サンゴ礁学会第 5 回大会，東京工業大学，2002 年 11 月

加藤 健・大谷謙仁・野崎 健・根岸 明・山室真澄・西村清和・  
林原 育・清水弘文・佐野元彦・玉城泉也：小型無人飛行  
船によるサンゴ礁藻場のモニタリング日本サンゴ礁学会  
第 4 回大会，琉球大学，2001 年 11 月

根岸 明・加藤 健・大谷謙仁・野崎 健・山室真澄・西村清和・  
林原 育・清水弘文・佐野元彦・玉城泉也：ROV によるサ  
ンゴ礁藻場のモニタリングシステムの運用，日本サンゴ  
礁学会第 4 回大会，琉球大学，2001 年 11 月

## 10 特許

(出願)

特願 2000-251588, 海草藻場の調査方法及び該調査方法に使  
用する装置，山室真澄・野崎 健・加藤 健・根岸 明・  
大谷謙仁

特願 2001-004792, 定点係留飛行船，加藤 健・野崎 健・根  
岸 明・大谷謙仁・富田 一正・三宅 明・山田 守

特願 2001-041057, 音響トランスポンダ、西村清和

特願 2002-303501, 水底生態系調査用撮影装置，山室真澄・  
大谷謙仁・根岸 明・野崎 健・加藤 健

特願 2002-315265, 空中写真地図作成装置，加藤 健・野崎 健・  
根岸 明・大谷謙仁・山室真澄

(登録)

US2002024594 Marine plant field survey method and survey  
system utilizing the survey method (2002. 2. 28)

NL1016874 Zeeplantvelidinspecitewerkwijze en  
-inspectiesysteem dat gebruik maakt van de  
inspectiewerkwijze (2002. 12. 11)