

原著論文

藻場分布状況把握への水中GPSシステムの適用性

齋藤和久^{*1}・道津光生^{*2§}・太田雅隆^{*2}・中尾 毅^{*3}

Mapping of the Distribution Pattern of Seagrass and Algal Bed Communities Using an Underwater GPS System

Kazuhisa Saito^{*1}・Kosei Dotsu^{*2§}・Masataka Ohta^{*2}
and Tsuyoshi Nakao^{*3}

要約: 藻場の分布範囲を効率的に把握する調査方法を検討するため、ダイバーが携行する水中GPSシステムを開発した。また、山口県柳井市地先海域のアマモ場においてこれを用いた目視調査を実施し、得られた分布図を同時に海域に6測線を設定し実施した目視調査による分布図と比較した。その結果、この新しい方法により、より少ない労力で正確な分布図を作成することができた。さらにこの水中GPSによる方法を一般的に実施されている船上測位による方法と比較検討した結果、迅速、安全かつ正確に藻場の分布状況を把握できると考えられた。さらに、今回の成果と文献情報をもとに、最近の水中測位システムの現状について解説した。

キーワード: 水中GPS, 藻場, 分布状況

Abstract: To examine efficient techniques for estimating the distribution area of seagrass and algal beds, we developed an underwater GPS system (UWGPS) to be carried by scuba divers. Then, we observed the distribution patterns of *Zostera* bed in the coastal area of Yanai, Yamaguchi Prefecture by UWGPS, and compared the distribution map with results from the line transect method that set 6 lines in the same area. Using UWGPS, we could determine the areas of the *Zostera* beds more precisely than by the line transect method. Furthermore, from the results of this trial, we considered that the distribution area of seagrass and algae could be traced more quickly, safely and accurately by the UWGPS method than by the method of tracking the diver's position by shipboard GPS. Furthermore, we reviewed underwater positioning methods from the current literature.

Key words: underwater GPS, seagrass and algal bed, distribution pattern

まえがき

「発電所に係る環境影響評価の手引」(経済産業省 原子力安全・保安院, 2007)においては、海域における動物、植物の項目の中で、調査すべき情報の一つとして「干潟、藻場、さんご礁の分布およびそこにおける動物(植物)及びその生息環境の状況」の項目が設けられている。上記手引では、藻場の存在する海域において、1 ha以上の藻

場がみられる場合には、①藻場の分布状況、②そこに生息する動植物、および③生息環境について調査することが求められている。藻場の分布状況を把握するための有効な方法の一つとしては、航空写真撮影による方法があり、広範囲に正確な分布状況を把握することができるが、多額の費用を要するとともに、実施に際しては天候等の気象条件に左右される。また、海域の透明度の制約をうけ、内湾の透明度が低い海域では実施することが

(2014年11月4日受付, 2015年1月22日受理)

*1 有限会社 aqua serve (〒814-0161 福岡県福岡市早良区飯倉4-28-40)

*2 公益財団法人 海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)
§ E-mail: dotsu@kaiseiken.or.jp

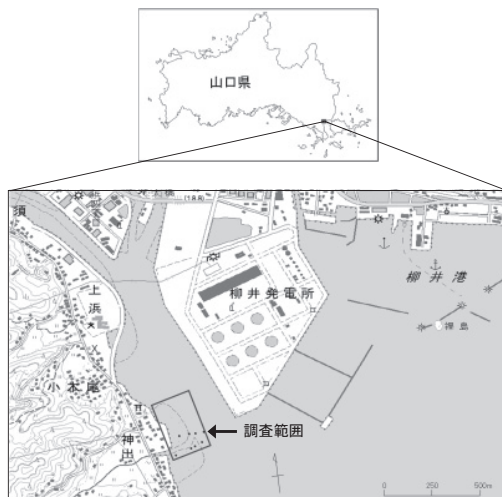
*3 株式会社 東京久栄福岡支店 (〒810-0072 福岡県福岡市中央区長浜1-3-4 綾杉ビル北天神 3F)

困難な場合が多い。また、航空写真撮影により藻場の分布を把握するためには、得られた映像による分布範囲に実際に藻場が存在するか否か、さらに藻場の構成種は何かを判定する必要があり、潜水目視による確認が必須である。安価で簡便な方法として、潜水やつり下げ型のビデオカメラによる分布状況の把握が実施されているが、通常の潜水では位置情報を正確に把握することができず、ビデオ映像では視野が狭く、種別の被度や大きさ等の得られる数値的な情報が不正確になるなどの難点がある。著者らはアマモ場の分布範囲を把握する効率的な調査方法を検討する一環として、有線によりダイバーが水中で操作可能なGPSシステムを開発した。本報告ではこのシステムを用いてコアモおよびアマモ群落の分布状況の把握を行った結果を紹介する。

なお、本研究は経済産業省から委託された、平成24年度発電所環境モニタリング手法検討調査（海洋生物環境研究所、2013）の成果の一部を用いてとりまとめたものである。

方法

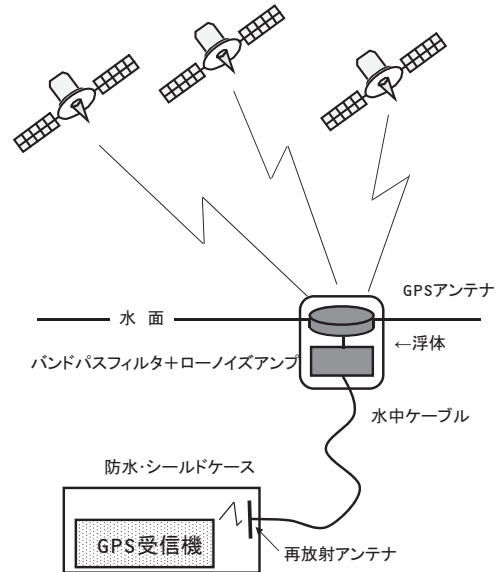
調査海域 調査は第1図に示す山口県柳井市に立地されている中国電力株式会社柳井発電所周辺海域（矢印の四角で囲まれる範囲）において実施した。



第1図 調査海域。

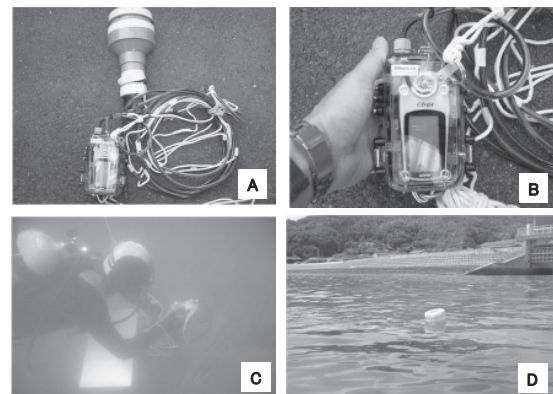
水中GPSシステムの概要 水中GPSシステム（以下、水中GPS）はGPSアンテナ、アンプユニット、水中ケーブル、再放射（送信）アンテナおよびGPS受信機（市販の携帯GPS; GARMIN社製, etrex H）より構成されている（第2図）。GPSアンテナ

は浮体に取り付けられ、水面上で上空のGPS電波を受信する。受信された電波はバンドパスフィルタによって不要な成分やノイズが除去され、さらにローノイズアンプによって必要な強度まで増幅される。増幅された電波は水中ケーブルによりダイバーが携行する操作部まで伝達される。水中ケーブルの末端には、再放射アンテナが取り付けられており、水面上で受信された電波と同等の電波を電波シールドされた防水ケース内に放射する。



第2図 水中GPSシステムの概要。

なお、本システムで得られる位置情報は水面上のGPSアンテナの位置となる。このため、ダイバーの位置（水中のGPSの位置）を正確に取得するには、位置測定の際に水深にあわせてケーブルをできるだけ引き寄せ、水面上のGPSアンテナとダイバーの位置のずれを小さくすることが重要である。調査に使用した水中GPSシステムの概観と使用状況を第3図に示した。



第3図 水中GPSシステムの概観および使用状況。A:システム全体図, B:操作部, C:海中での使用状況, D:浮体にとりつけられたGPSアンテナ部。

測線調査 水中GPSによる調査に先立ち、調査海域内のアマモ・コアマモ群落の分布状況の概要を把握するため、幅約50mの間隔で6測線を設定し、目視による調査を実施した。調査は平成24年7月24～25日に2名の作業員（船上の監視員等を除く、水中GPS調査も同様）により実施した。調査測線はコンクリート護岸下の砂泥域（平均水面付近）を基点とし、沖合の方向にアマモが出現しなくなるまでとした。基点より10m毎に50cm×50cmの調査枠を設定し、観察時刻と観察時の水深、底質（底質区分は砂、砂泥、長径0.15m未満の転石）を記録するとともに、出現する海藻草類の被度（5%未満、5～25%未満、25～50%未満、50～75%未満、75%以上に区分）およびアマモ*Zostera marina*、コアマモ*Zostera japonica*の株数、最大葉長を測定した。

水中GPS調査 水面まで伸びるアンテナケーブルを接続した水中GPSを曳航したダイバーの自由遊泳により、アマモ群落、コアマモ群落の縁辺および群落の内側、外側を目視観察し、適時、水中ケーブルを引き寄せ、way point（ナビゲーション用語、チェックポイント）をGPS上に記録するとともに、種別（アマモ、コアマモ）の分布範囲および被度を記録した。なお、調査の効率化のため、一部の浅所域においては、干潮時に携帯GPSを携行し、徒歩による観察を実施した。調査は平成24年7月27日に2名の作業員により実施した。

なお、本報告では、測線調査、水中GPS調査ともに最低水面（CDL；Chart Datum Level）を0mとしてとりまとめを行った。柳井海域における、平均水面（MSL;Mean Sea Level）とCDLの差（Zo）は1.8mであり、本報告における0mの大潮満潮時の実測水深は3.6mに達する。

結果

測線調査 測線調査による取得データの例として、測線6の結果を第1表に示した。本測線におけるコアマモは最低水面上1.3mから0.4mの範囲、アマモは0.6mから-0.6mの範囲で出現し、部分的に混成するものの、岸-沖方向に分布範囲が分かれていた。

測線調査により得られた個々の方形枠内のコアマモ、アマモの被度（5%以上）を第4図に色別の方形で示すとともに、これらの結果をもとに想定されるコアマモとアマモの分布を青色の外挿曲線で示した。コアマモ、アマモともに基本的には深淺方向に連続して出現したが、時にスポット的に観察される場合も見られた（第4図a～f）。コアマモは最低水面より岸側に分布し、2つの比較的大きな群落と測点a-bからなる小群落に区分された。アマモは最低水面より沖側に分布する傾向にあり、測点cを含む1つの大群落と測点d-eおよびfからなる小群落に区分された。

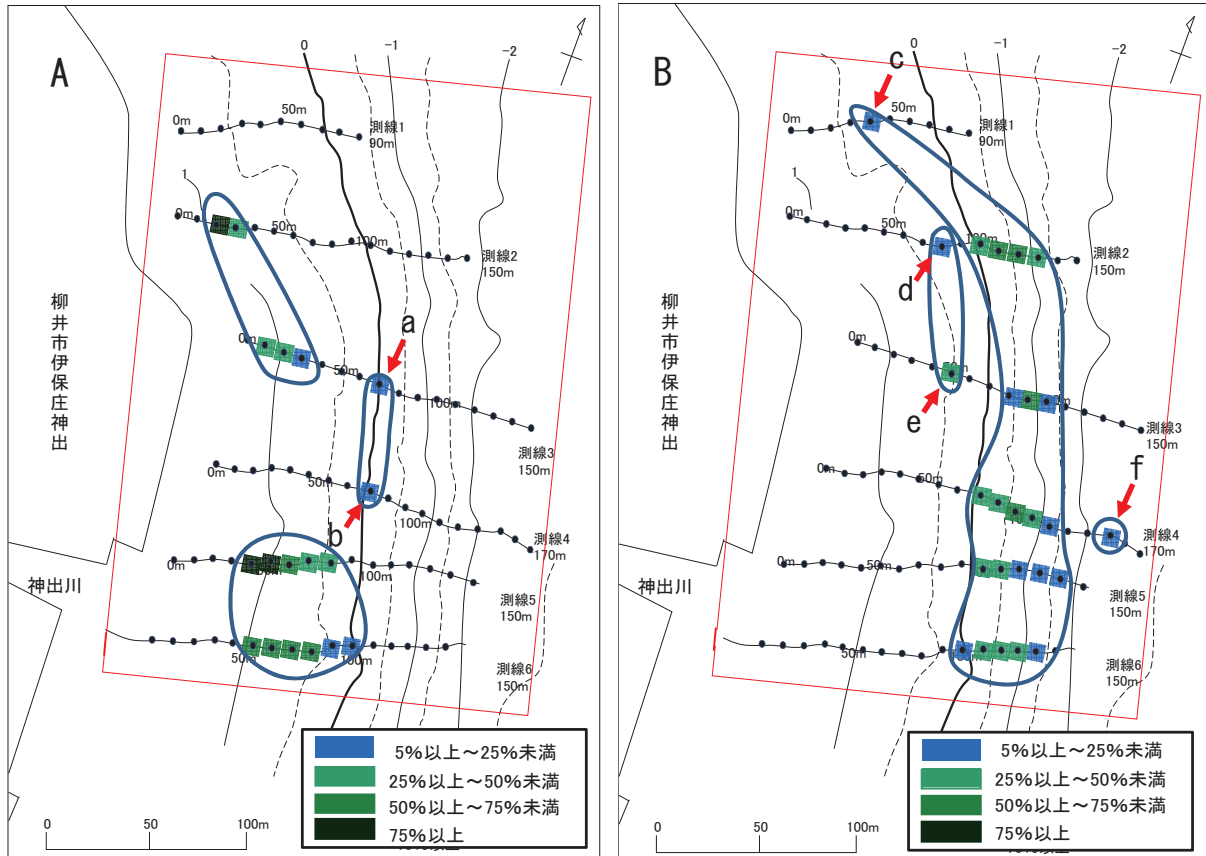
第1表 測線6における海藻草類の目視観察結果

種名	測定項目	基点からの距離 (m)															
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
出現海藻草類	アマモ 被度(%)											10	25	30	40	10	
	株数(本)											12	21	16	15	4	
	最大葉長(cm)											54	77	85	87	54	
出現海藻草類	コアマモ 被度(%)						60	60	70	60	20	20	R				
	株数(本)						650	500	840	750	160	67	43				
	最大葉長(cm)						12	14	16	12	14	24	19				
オゴノリ	被度(%)	R															
アオサ属	被度(%)	R								R							
底質		砂	砂泥	転石	砂泥	転石	砂泥	転石	砂泥	転石	砂泥	転石	砂泥	転石	砂泥	転石	
水深 (CDLからの高さ, m)		1.6	1.6	1.5	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.6	0.4	0	-0.4	-0.6	-1.2

* 表中のR は被度5%未満を示す。

水中GPS調査 水中GPSを用いた目視調査によって得られたコアマモとアマモの分布を第5図に示した。本調査で得られた分布図では、複雑で変化に富んだ群落の分布状況が再現された。コアマモはアマモ群落の岸側に3つの群落を形成するとともに、その中間などに3つの小さなパッチがみられ、概ねCDL 0~1mの範囲に分布していた。被

度25%以上の分布は主にCDL 0.5~1mの範囲でみられ、被度50%以上の分布はCDL 1m付近でみられた。アマモは調査範囲内の沖側に連続した大きな群落を形成しており、概ねCDL-2~0.5mの範囲に分布していた。被度25%以上の分布は主にCDL-1.5~0mの範囲でみられ、被度50%以上の分布はCDL-1~-0.5m付近でみられた。



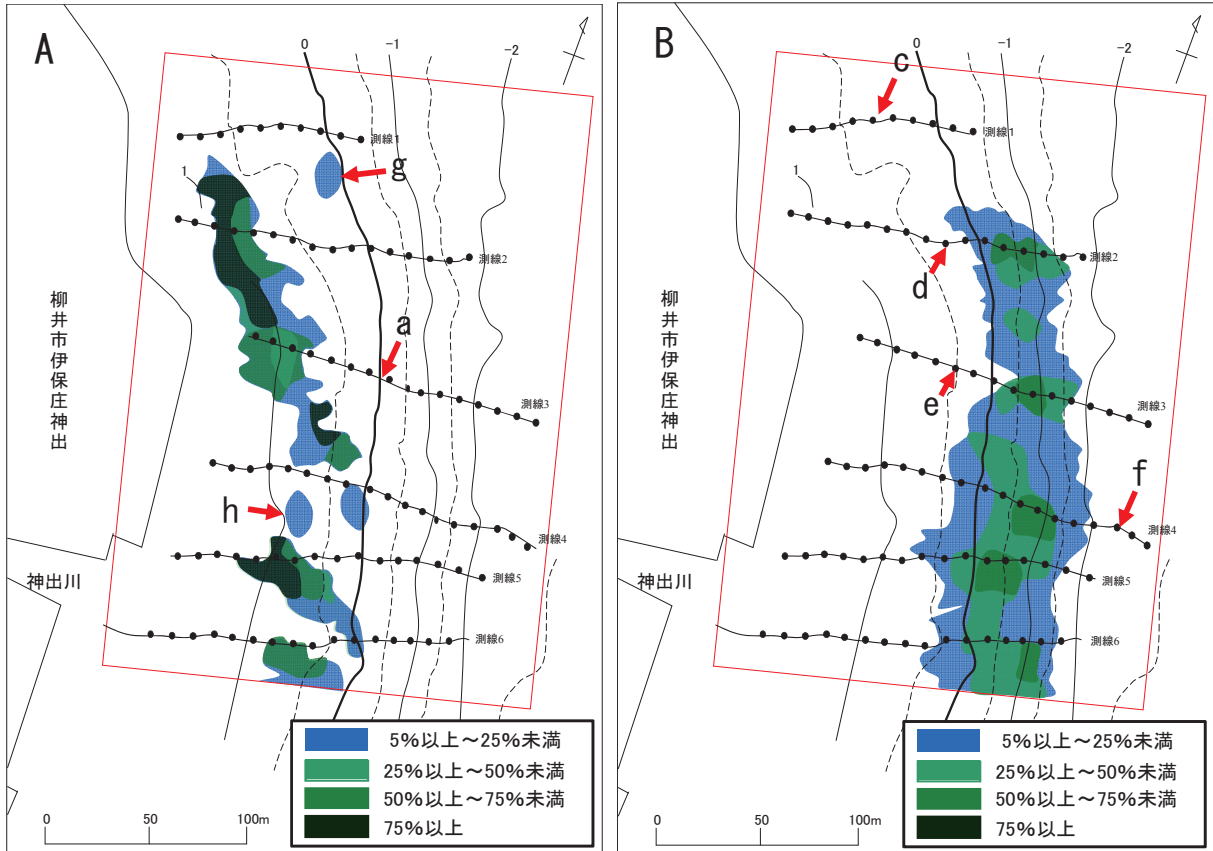
第4図 測線調査より作成したアマモ・コアマモ群落の分布。A: コアマモ群落, B: アマモ群落。

考 察

測線調査と水中GPS調査による分布図の比較 測線調査では10m間隔の方形枠内の観察となるため、群落の分布範囲の把握とともにそれぞれの地点においては、コアマモ、アマモの被度に加え、株数、葉長、その他の生物、底質などの様々な情報を得ることが可能である(第1表)。一方、水中GPSによる調査では、群落の縁辺をトレースすることにより、測線調査に比べて実態に即した分布図を作成することができた(第5図)。

水中GPSを用いた観察(第5図B)では、アマモ

群落は測線2の北側で収束しているにもかかわらず、測線調査の結果(第4図B)では、c(測線1)の位置でアマモがスポット的に観察されたために、北側へ延長される結果となった。また、測線調査ではa(測線3)、b(測線4)でスポット的に確認されたコアマモや、同様にd(測線2)、e(測線3)で確認されたアマモから分布範囲を外挿したために、水中GPS調査では見られなかった群落を地図上に記載してしまう結果となった。今回の測線調査では、50m間隔で測線を設定したが、この調査では、得られる情報が点の情報となる。そのため、分布範囲を詳細に把握するためには、より多くの



第5図 水中GPS調査より作成したアマモ・コアマモ群落の分布。A: コアマモ群落, B: アマモ群落。

測線を設定することが必要となる。今回の調査では、測線調査で2名×2日、水中GPS調査で2名×1日の作業を要したが、測線調査で当該海域のアマモ場の分布状況を水中GPS調査と同等の精度で把握するためには、より多くの時間、労力、費用を要することとなる。

本報告では、水中GPSを用いた方法により、コアマモ群落、アマモ群落の分布状況をより少ない労力で詳細に把握できることを示した。また、測線調査において、設定した測線の間分布していたためにとらえることのできなかつたコアマモ群落g, hの存在を確認することができた。一方、測線上でスポット的に方形枠内に出現したコアマモa (測線3) およびアマモc (測線1), d (測線2), e (測線3), f (測線4) は、一連のコアマモ、アマモの群落より距離があり、独立していたために、水中GPSによって群落の縁辺を連続的に観察する方法では、これを確認することができない場合もあるという状況が生じた。

水中GPSの利点と活用法 藻場の範囲を把握する

ために一般的には、ブイを曳航したダイバーを調査船で追跡し、船上でGPSにより測位する方法が用いられている。この方法は、高価な測器を使用しないため、経費も抑えられ、また、ダイバーが直接観察をすることで、種の判別もできる利点があるが、ダイバーと調査船が離れているために、測位のためには、いったんブイに船を寄せる作業が必要となり、時間がかかるとともに、位置情報が不正確になりがちである。類似の方法として、観察者をロープにつかまらせ、水面上を調査船により曳航し観察を行うマンタ法と呼ばれる調査法(沖縄総合事務局開発建設部・港湾空間高度化環境研究センター港湾海域環境研究所, 2007)があり、造礁サンゴの分布調査などで用いられる。この方法は、広範囲を少ない作業員でカバーでき、作業性に優れているが、移動する調査船上で測位を行うために、観察の精度や測位の正確さに欠け、また、海面上から観察を実施するため、透明度のよい海域でのみ実施可能であるという制約がある。

今回実施した水中GPSによる調査は、ブイ曳航

一船上測位による潜水目視調査の改良型と位置付けることができる。水中GPS測位による方法をこれまでの船上測位による方法と比較し、安全性、正確性、効率性の観点から検討すると、安全性においては水中GPSを用いることにより、測位のために調査船がダイバーの曳航するブイに接近する必要がないため、ダイバーと船の接触やプロペラへの巻き込みの危険が回避される。また、ダイバーが位置確認のため浮上する回数が少なくなり、調査船の測位作業を待つ必要がないため、潜水時間や潜行・浮上の回数が減り、減圧症、空気塞栓症の予防に効果的であると考えられる。正確性においては、調査船上から測位するのではなく、GPSのアンテナがダイバーの真上にある状態で測位することにより高い位置出しの精度を得ることができる。

なお、今回の調査では、調査範囲のアマモ群落、コアマモ群落は、縁辺が比較的明瞭であり、大きくまとまった群落として分布していたが、群落の縁辺が不明瞭であったり、第5、6図a～fのように小さな群落が散在して分布する場合や、海域の透視度が低い場合は、ダイバーが藻場の縁辺に沿って遊泳するのが難しくなることが予想される。藻場の分布域の把握は、今回実施した水中GPSによる目視調査のみでも十分可能であるが、必要に応じて、測線目視、音響測深機、航空写真撮影など複数の調査を組合せ、各結果を補完して最終的な分布域を作成することで、より精度の高い分布図の作成が可能となると考えられる。

水中下での位置情報の取得方法 沿岸域の生物・環境調査において、調査地点の位置情報の取得は欠かすことのできない重要な作業である。以前は六分儀と三稜分度器による測位が行われていたが、GPSの出現により、より迅速に測位することが可能となり、さらに近年ではGPSが小型し、安価となったため、この携帯GPSによる測位が主流となってきている。しかしながら、水中においては、衛星からの電波を受信することが不可能であるために、陸上や船上もしくは水面上でのみ測位可能である。中嶋（2010）は、浅所における藻場分布状況の把握方法として、ビニール製の防水パックに携帯GPSを入れ、水面遊泳による観察を提案している。本調査においても、一部の浅所域では、干潮時に携帯GPSを携行し、測位を行った。この方法により位置情報を取得できるのは、水深

が浅く、水面から藻場等の対象物が確認できる範囲である。より深い水深帯で正確な位置情報を得るためには、水中で操作可能なシステムが必要となる。

現在考えられているシステムは、①水上のアンテナで得られた衛星からの電波を水中ケーブルにより水中の防水ケースに入れられた携帯GPSに送信する方法（Kuch *et al.*, 2009, 2012；本報告）、②船上や固定ブイに設置された基地局のGPSで得られた位置情報と基地局と水中の受信機との間の相対位置を音波により測定し、これを演算することにより水中の位置を算出する方法（Sgorbini *et al.*, 2002；岡部, 2010；アカサカテック, 2011）に大別される。①はシステムの構成がシンプルで安価であるが、作業深度が水中ケーブルの長さで規定される。Kuch *et al.* (2009, 2012) は、本報告と同様のシステムで、位置情報に加え、水深も確認できるシステムを開発したが、これを使用した調査事例については現在のところ報告されていない。②の方法は、主に水中構造物の設置作業のために用いられる（岡部, 2010；アカサカテック, 2011）が、この方法による藻場分布観察の事例として、Sgorbini *et al.* (2002) が実施した、地中海沿岸に分布する海草 *Posidonia oceanica* の分布状況把握の例がある。Sgorbini *et al.* (2002) は、海域にGPSを備えた4つのブイ（基地局）を設置し、ダイバーが操作する水中スクーターに設置されたピンガーから送信される音波を受信して、ピンガーとブイの距離よりダイバーの位置を計測した。船上ではピンガーの軌跡と水深をリアルタイムでコンピュータに記録される仕組みとなっている。ダイバーは藻場の縁辺を移動しながら随時停止し、way pointを記録するとともに、スクーター上に備え付けられた水中ノートに藻場の状況を記載した。得られた結果については、本報告と同様に、ベルトトランセクト法による結果との比較を行い、より迅速に正確な分布範囲の把握ができた。Sgorbini *et al.* (2002) の方法は潜水作業者が水中ケーブルに拘束されないという利点があるが、システムが高価で複雑である。最近では音波測位による安価で小型のシステム（Navmimate）も開発されている（SHB Instruments, 2014）。これはレジャーダイバーの安全性確保のために開発されたものであり、複数のダイバーにより互いの位置を水中で確認することができる。この方法では基地局と水中機器との間の距離を音波により

測定しているため、両者の間に構造物や海藻等の遮蔽物がなく、直線で結ぶことができる必要があるとしている。現在のところ、このシステムが我が国で藻場分布状況の把握に使用された例はなく、藻場分布状況把握に使用するためには、まず、現地実験による藻場内での測位が可能か否かの検証が必要であろう。

我々が今回使用した水中GPSシステムは、観察の精度の高さとともに作業の効率性、安全性、使用実績等を勘案すると、藻場の分布範囲の把握手段として最も優れた方法の一つと考えられる。

謝 辞

本報告の取りまとめに際し、ご助言をいただいた（公財）海洋生物環境研究所木下秀明博士、馬場将輔博士、現地調査にご協力いただいた、中国電力株式会社ならびに山口県漁業協同組合柳井支店の関係各位に深謝いたします。また調査の実施に際しては、（有）aqua serve藤原数樹氏ほか（株）東京久栄所属の現地スタッフに多大なる御協力をいただき心からお礼申し上げます。

引用文献

- アカサカテック(2011). 水中測位装置, RTK-GPSによる水中位置決めシステム. http://www.akasakatec.com/case/case_trapon.html (2014年8月29日閲覧)
- 経済産業省 原子力安全・保安院 (2007). 発電所に係る環境影響評価の手引き(平成19年1月改訂). 1-451.
- 海洋生物環境研究所 (2013). 経済産業省委託平

- 成24年度発電所環境モニタリング手法検討調査報告書. 海洋生物環境研究所, 東京, 1-197.
- Kuch,B.,Koss,B.,Buttazzo,G. and Sieber, A.(2009). Underwater navigation and communication:A novel GPS/GMS diving computer. *Proc.of the 35th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society*, (1-4). <http://retis.sssup.it/~giorgio/paps/2009/eubs09-gps.pdf> (2014年8月29日閲覧).
- Kuch,B.,Buttazzo,G.,Azzopardi,E.,Sayer, M. and Sieber, A.(2012). GPS diving computer for underwater tracking and mapping. *Underwater Technology*, **30**,189-194.
- 中嶋 泰 (2010). 携帯GPS.「藻場を見守り育てる知恵と技術」(藤田大介, 村瀬 昇, 桑原久実 編著), 成山堂書店, 東京, 71-75.
- 岡部勝信 (2010). 潜水作業の安全性を向上させる「水中位置測定装置」. *Marine voice 21*, **268**, 20-23. http://www.umeshunkyo.or.jp/ronbun/Marine_Voice_268.pdf (2014年8月29日閲覧).
- 沖縄総合事務局開発建設部・港湾空間高度化環境研究センター港湾海域環境研究所 (2007). 沖縄の港湾におけるサンゴ礁調査の手引き. 1-143.
- SHB Instruments (2014). Navimate GPS for Divers. <http://www.navimate.com/> (2014年8月29日閲覧)
- Sgorbini, S.,Peirano, A.,Cocito,S.and Mogigni,M.(2002). An underwater tracking system for mapping marine communities: an application to *Posidonia oceanica*. *Oceanol. Acta*, **25**, 135-138.