

技術報告

水産研究・教育機構における水中グライダー運用記録と 今後の活用法

清水勇吾^{*1}・奥西 武^{*2}・笈 茂穂^{*2}・長谷川大介^{*2}・和川 拓^{*3}・井桁庸介^{*3}・
本多直人^{*3}・瀬藤 聡^{*1}・黒田 寛^{*4}・伊藤進一^{*5}

The history of operating ocean gliders by the Japan Fisheries Research and Education Agency and prospects for their future use

Yugo SHIMIZU, Takeshi OKUNISHI, Shigeho KAKEHI, Daisuke HASEGAWA, Taku WAGAWA, Yosuke IGETA,
Naoto HONDA, Takashi SETOU, Hiroshi KURODA and Shinichi ITO

Ocean glider is one of autonomous underwater vehicles for observation of the ocean. Japan Fisheries Research and Education Agency (FRA) has been operating the three ocean gliders (one Slocum and two Seagliders) since 2007. Up to the present, we have experienced various problems including leaks into the Slocum and the pressure sensor breakdowns of the Seagliders which both led to impossibility of movement and resulted in emergent retrievals. We have improved the glider deployment and retrieval methods, and developed the original systems to monitor the gliders and transmit the data to FRA-ROMS, which is the FRA's ocean model system. In this document, we describe the historical and technical developments in operating the gliders and then suggest the future prospect of the glider usage in FRA. By operating the gliders in data-sparse areas/periods, we can expect to improve quality in re-analysis data of FRA-ROMS and its accuracy in the forecast.

キーワード：水中グライダー

2016年3月18日受付, 2016年11月14日受理

水中グライダーは自律型無人潜水機の一つであり、ヒレ状・翼状の構造体と舵を持ち、ブレンダーと呼ばれる浮袋を収縮・膨張させるなどの方法で浮力を変化させ、潜行・浮上を繰り返しつつ水平方向にも移動しながら搭載センサーによって観測を行うことができる(図1)。浮上後には、イリジウムなどの人工衛星電話サービスを用いて、陸上のデータ送受信サーバーに浮上位置および観測データを送信するほか、陸上のオペレーターからのコ

マンド送信によって、観測深度、観測間隔、移動方向などを操縦(オペレーティング)できる。

国立研究開発法人水産研究・教育機構(2016年3月31日までは国立研究開発法人水産総合研究センター)の各水産研究所や都道府県水産関係試験研究機関においては、近年の調査船海洋モニタリング予算と調査船隻数・従事者数の減少、燃油価格の高騰などによって、海洋モニタリングの自動化や省力化が求められる一方で、

^{*1} 国立研究開発法人 水産研究・教育機構中央水産研究所

^{*2} 国立研究開発法人 水産研究・教育機構東北水産研究所

^{*3} 国立研究開発法人 水産研究・教育機構日本海区水産研究所

^{*4} 国立研究開発法人 水産研究・教育機構北海道水産研究所

^{*5} 東京大学大気海洋研究所

〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4

National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency

2-12-4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

yugo@affrc.go.jp



図1. 水中グライダーの移動とデータ・コマンド通信を表す模式図

水産業や水産研究に役立つ海況情報の提供の高度化も求められている（那須ら 2011）。また技術革新によって、2000年代に入り水中グライダーが開発され、米国を中心に商業ベースで販売され始めた。このような状況のもと、海洋モニタリングと海況情報提供、水産海洋研究への水中グライダーの導入と展開が期待され、当機構の東北水産研究所（以降、東北水研と略す）では、2007年度に水中グライダーの一つである米国 Teledyne Webb Research 社製 Slocum を日本で初めて購入した（伊藤ら 2016）。また、2011年3月11日に発生した東日本大震災の津波によって宮城県、福島県は漁業調査船を失ったため、手薄となった東北太平洋側の海洋モニタリング体制を補うために、2011～2012年度に米国 iRobot 社製の Seaglider と呼ばれる水中グライダーを2台購入した（2016年3月現在、Seaglider の販売権は米国 Kongsberg Underwater Technology 社に移管されている）。

水中グライダーを海洋モニタリングや水産海洋研究の現場に導入するためには、調査船からの投入・回収方法、および、オペレーティング体制の確立、水中グライダーの移動能力や観測継続時間・観測データの特性と観測に適した海洋現象のスケールの把握、さらに、その観測データの利活用のための情報処理システムなどの付随環境の整備・開発を行う必要がある。当機構では、2012年度より4か年で行われた交付金重点課題「海洋モニタリング～漁海況情報提供までの一貫システムの構築」のもと、水中グライダーの海洋モニタリングや水産海洋研究現場への導入と漁海況情報提供への応用を目指し、東北水研を中心に上記3台の水中グライダーの運用試験を行ってきた。本稿では、これまでの運用経験を通じて直面した主な問題とその解決法、確立した体制やシステム、改善すべき点などを記録するとともに、水中グライダーを用いた今後の海洋モニタリングへの応用に関する展望を提言することを目的とする。

当機構所有の水中グライダーの特性と性能

前述のとおり、現在、当機構で所有している水中グラ

イダーは Slocum が1台、Seaglider が2台である。

東北水研が購入した Slocum は全長約 1.5m、空中重量約 60kg、耐圧・潜行深度は 1000m の仕様のものであり、仕様上の最大移動速度は約 0.6 ノットである。搭載センサーやミッション（どのように観測させるか）、運用海域により電池の消耗割合が変化するものの、搭載する電池がアルカリ電池の場合は最長 1 か月程度、リチウム電池の場合は最長 8 か月程度の運用が可能である。購入当初、本機は圧力、水温、塩分、溶存酸素、蛍光光度（クロロフィル *a* 濃度）の各センサーを搭載していた。本機は、投入する前に約 1g の球形重りを用いて浮力と重心の調整（バラストイング）を必要とし、東北水研では組み立て式のプールに海水を張って、この作業を行っている。

東北水研が購入した2台の Seaglider は通信用アンテナを含め全長約 2.5m、空中重量約 60kg、耐圧・潜行深度は 1000m の仕様のものであり、仕様上の最大移動速度は約 0.6 ノットである。リチウム電池を搭載し、最長 10 か月程度の運用が可能である。2011年度に購入した Seaglider の機種識別番号 SG552 は、圧力、水温、塩分センサーを搭載し、2012年度に購入したもう一つの Seaglider SG572 は、圧力、水温、塩分、溶存酸素、蛍光光度、濁度、CDOM（Colored Dissolved Organic Matter；有色溶存有機物）の各センサーを搭載した。本機は、バッ



写真1. 東北水研の水中グライダー Slocum



写真2. 東北水研の水中グライダー Seaglider

テリー交換およびバラストリングを海外の販売業者または日本代理店に委託する形態となっている。

当機構における水中グライダーの運用記録

東北水研 Slocum は 2007 年度に納品以来、2013 年 12 月に本体を Slocum G2 に換装するまで、漏水などのトラブルが頻発し、長くても 1 週間程度の運用で終わっていた (表 1)。漏水は、CTD センサーにつながるケーブル取り付け部などで確認され、そのたびに修理したものの、漏水が発生し続けた。納品された Slocum は 1000m 潜航仕様でセンサーをフル装備した世界初の機種であったため、製造販売主も想定外のトラブルに見舞われ続けていたのかもしれない。その後、後継機種である Slocum G2 に無償換装後は、漏水は発生していないものの、これまでの経緯に加え、長期観測にはすでに Seaglider を用いるような体制に移行したことから (後述)、1 か月を超えるような運用に至っていない。

東北水研の Seaglider 2 台は漏水など本体に関わる問題は発生せず、2012 年 6 月 28 日からの最初の投入から 70 日間にわたる連続観測を行うことができた (表 2)。また当初は北緯 38 度線に展開されていた JKEO ブイ、係留系群の間を補完するような観測に用いられていた (伊藤ら 2016)。2013 年 5 月 10 日に投入した Seaglider SG572 は圧力計に異常をきたして 7 月 7 日回収、その後、2013 年 12 月 2 日に投入した SG552 にも圧力計の異常が発生して翌年 1 月 22 日に回収に至った (表 2)。圧力が測定できないと、潜行・浮上の挙動を正確に制御できないため、制御リスクが比較的低い約 50m の浅い潜行を繰り返すか、海面を漂流させることになる。この場合、水中グライダーの水平方向の移動能力を失い (図 2)、海流でどこに流されていくかわからないため、緊急回収せざるを得ない。圧力計異常で緊急回収に至った Seaglider 観測は 3 回あり、最短は 2014 年 7 月 18 日に投入し 21 日後に回収した SG572 の観測である。圧力計異常が連続して発生したため、異なる形式の圧力計に交換を行い、2015 年以降は運航に関わる異常はなく、2 か月以上の連続観測もすでに行っている。回収に適した調査航海や季節などを考慮して、70 日を超える連続観測を行っていないが、電池の容量を考えればもっと長い観測も行えると考えられる。これまで Slocum と Seaglider は東北水研漁業調査船若鷹丸で投入・回収を行ってきたが、Seaglider の運用展開を考え、2015 年 9 月 1 日～5 日には日本海区水産研究所 (日水研) 主体のオペレーションで、漁業調査船みずほ丸による投入・回収を実施し日本海の佐渡島沖で運用を行うことができた。

表 1. 東北水研 Slocum のこれまでの運用・問題点・対処の記録 (太い字体で記載した箇所はトラブルが発生したことを示す)

日付	試験／調査／発生した問題／対処など
2007 年 9 月 6 日	東北水研調査艇海門で仙台湾において試験調査を行う
2007 年 9 月 11-14 日	若鷹丸移行領域モード水海域調査で投入、データ欠落が一部発生 (1000m 用フル装備の初号機のため通信バッファ不足が判明)
2007 年 12 月 14 日	CTD 校正
2008 年 3 月 3, 5, 10 日	若鷹丸親潮～混合水域調査で投入するも漏水発生のため各 1 日の運用で回収
2008 年 6 月 16-18 日	業者による浸水検査 (アルミハウジングに交換), DO センサー交換, CTD 校正, CPU メモリ拡張
2008 年 9 月 1-4 日	業者による館山沖での試験調査, バッテリーのリチウム電池への変更, バラストリング (人工海水)
2008 年 9 月 11-14 日, 14-17 日	若鷹丸移行領域モード水海域調査で投入, 潜航深度を 950m に設定したが, 300m 弱までしか潜航せず。重り約 60g を加えた結果, 700m 付近まで潜航できるようになったが, スムーズな潜航は 500m 付近まで。リチウムバッテリーに変えた際のバラストリングに人工海水を用いた問題と考えられる
2009 年 2 月 15 日	リチウム予備バッテリー購入, ドックサーバー予備機購入
2009 年 3 月 2-9 日	若鷹丸親潮～混合水域調査で投入, 漏水発生のため緊急回収
2009 年 7 月 4 日	O リング, CTD, バッテリー交換, ソフトウェア大幅バージョンアップ
2009 年 7 月 15-18 日	若鷹丸親潮～混合水域調査で投入, データ処理が正常にできず, 再度ソフトウェア修正を要請
2010 年 2 月 19 日	リチウム予備バッテリー購入
2010 年 5 月 14-17 日	若鷹丸親潮～混合水域調査で親潮域の定点観測のため投入
2010 年 7 月 14-22 日	若鷹丸親潮～混合水域調査で北緯 38 度線観測を実施させるために投入するも漏水のため回収
2010 年 12 月 1 日	圧力センサーに繋がる下部カウリングの内部に取付けのケーブル取り付け部から漏水を確認, 同ケーブル交換, 加圧試験, 予備バッテリーに交換
2012 年 2 月 10 日	リチウム予備バッテリー購入
2012 年 6 月 25-26 日	混合水域にて試験潜航, 初回潜行 400m で漏水のため回収
2013 年 2 月 10 日	CTD 取り付け部からの漏水を確認, 修理, 予備バッテリーに交換
2013 年 9 月 10-11 日	混合水域にて集音装置観測, 初回潜航 200m で漏水, 回収
2013 年 12 月 8 日	無償補償で Slocum 本体を G2 への変更
2014 年 5 月 13-15 日	業者立ち合いのもと南伊豆で試験
2014 年 7 月 23-25 日	若鷹丸により混合水域にて投入, 集音装置観測
2015 年 9 月 19 日	仙台湾にて動作テスト
2015 年 8 月 29-31 日	若鷹丸により混合水域に投入し, 暖水塊内部の観測

表 2. 東北水研 Seaglider (SG552, SG572) の運用歴 (太い字体で記載した箇所はトラブルが発生したことを示す)

機種番号	期間	観測海域	備考
SG552	2012/06/28- 2012/09/05 (70日間)	北緯 38 度線	
SG572	2013/05/10- 2013/07/07 (59日間)	北緯 38 度線	圧力計異常発生、若鷹丸で緊急回収
SG552	2013/12/02- 2014/01/22 (52日間)	北緯 38 度線	圧力計異常発生、北光丸で緊急回収
SG572	2014/07/18- 2014/08/07 (21日間)	北緯 38 度線	圧力計異常発生、開発センター用船第五萬漁丸で緊急回収
SG572	2015/03/09- 2015/05/18 (70日間)	道東親潮域	
SG552	2015/05/14- 2015/07/12 (60日間)	北緯 38 度線 + 東経 143 度線	
SG552	2015/09/01- 2015/09/05 (5日間)	佐渡島沖	日水研で運用、みずほ丸で投入・回収

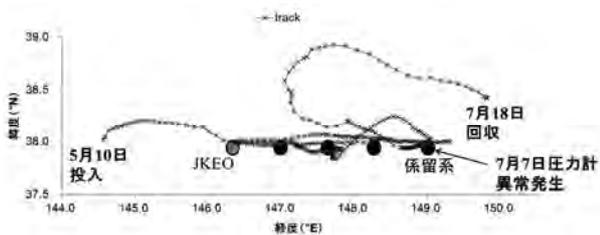


図 2. 2013 年 5 月～7 月の Seaglider SG572 の航跡
図中の×印は水中グライダーの浮上点を表し、JKEO と記した灰色の丸は国立研究開発法人海洋研究開発機構が設置していた表層ブイ JKEO の位置、それ以外の 4 つの黒丸は東北水産研究所が海底に設置していた流速観測用の係留系の位置を示す

当機構で確立した水中グライダーの投入・回収法

水中グライダーは、Slocum, Seaglider とも全長 1.5m 以上、空中重量約 60kg にもなる大型の精密機器であり、外洋の波を受けて揺れる漁業調査船からの投入・回収には細心の注意を要する。東北水研では、試行錯誤しながら、投入法・回収法を確立してきたので、ここに記述する。
投入法 投入に際しては、通信用アンテナに故障が発生すると観測・運航が不可能となるため、特にアンテナの扱いに注意を要する。若鷹丸乗組員と作業を検討しつつ、2 種類の方法を確立した。一つの方法は、水中グライダーをゴムボートに積み込み、調査船より離れて投入する方法である (写真 3)。この方法では、ゴムボートに乗組員が数名乗りこみ、操艇しながら投入作業を行う必要があるため、海がよく風いていることが条件となるが、投

入時には調査船から離れるため、船に衝突して水中グライダーが損傷する可能性は極めて低い。もう一つの方法は、調査船に装備されているクレーンを用いて、微速で水中グライダーから離れつつ投入する方法である (写真 4)。この方法では、まずスナップシャックルなどで随時解放できるようにしておきながら水中グライダーをクレーンの先にロープで吊り下げる。その後、クレーンを用いて調査船の外に吊り出してスナップシャックルの操作で吊り下げたロープから解放して水中に投入する。その際、調査船は水中グライダーとの衝突を回避するために離れていく。この方法でも海象の好条件を要するだけでなく、ゴムボートを用いるよりも調査船の船体に衝突する危険はあるが、投入時間の短縮、乗組員のリスク回避などの利点がある。

回収法 回収時には、オペレーターから水中グライダーに海面漂流コマンドを送り、回収モードにする必要がある。浮上位置は準リアルタイムでモニターできるが、実際に船から回収する際には視認する必要があるため、基本的には日中に行わなければならない。また、荒天時は避けるべきである。船上にデータ送受信サーバーがない場合には、陸上のオペレーターと交信しながら洋上で探索



写真 3. ゴムボートを用いた Seaglider の投入 (若鷹丸より 2012 年 6 月)
Seaglider を積んだ状態でゴムボートを水面に下し、乗組員 2 名がゴムボートに乗り込んで、調査船より離れて Seaglider を投入した

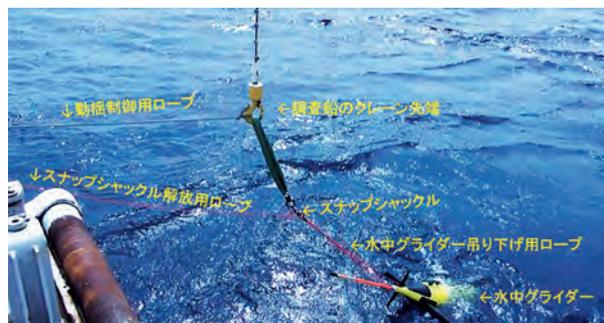


写真 4. 調査船クレーンを用いた Seaglider の投入 (みずほ丸より 2015 年 9 月)
微速で船を走らせつつ、スナップシャックルの解放操作によって水中グライダーを海中に放つ

する必要がある。水中グライダーは浮上時に通信用のアンテナを空中に出している状態（写真5）になるので、これを目印に肉眼または双眼鏡で探索することになる。

投入時と同様に、ゴムボートによる回収と調査船から直接回収する方法があり、いずれも海が風いていることが必要である。当初は調査船と水中グライダーの衝突を避けるためにゴムボートによる回収を行っていたが、以下の工夫の結果、調査船を水中グライダーに寄せて直接回収できるようになった。最近はこの方法を多く採用しており、大きな問題も起こっていないため、これを紹介

する。水中グライダーは Slocum, Seaglider ともアンテナ部以外はロープを掛けて持ち上げても自重を支えられるため、本体にロープを掛けて安定させられれば調査船から直接回収することもできる。Seaglider は海中から直立したような形で海面に浮上するので（写真5 (b)）、調査船の舷より海面に届く長さの作業用棒の先端に輪状の金具を取り付け、ループを作ったロープのループ部を輪の周りに張ったものを準備し（写真6）、船を近づけて上から被せ（写真7 (a)）、ロープのループ部で Seaglider の本体尾部を締め付けて捕縛後、舷に衝突しないように作業用の支え棒で押さえながら、クレーンで引き上げ船内に取り込む（写真7 (b)）。Slocum は斜めに浮かぶため（写真5 (a)）、ロープの掛け方が異なるものの同様の方法で2015年8月の調査で回収に成功している。

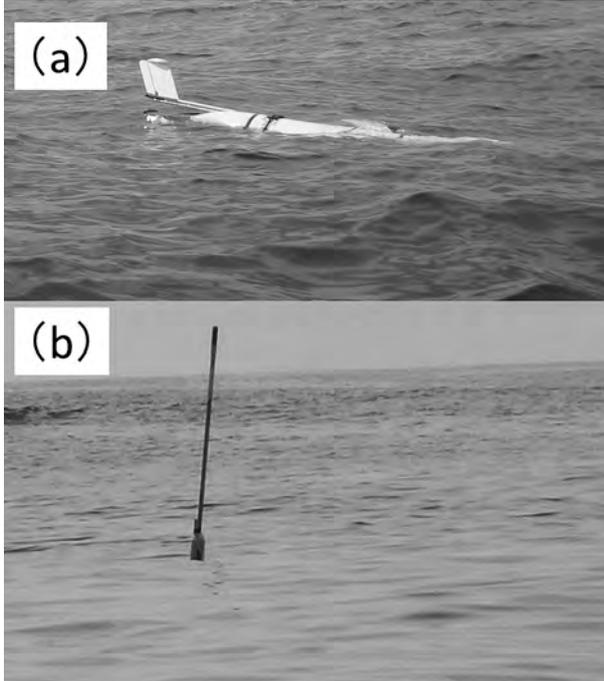


写真5. 浮上時の水中グライダーの様子 (a) Slocum, (b) Seaglider



写真6. 若鷹丸の舷から Seaglider にロープをかけるため工夫された回収用棒
舷から海面に届く長さの棒の先に輪を設置し、引っ張ると縮まるようにループを作ったロープ（灰）のループ部分を輪の周りに張って、テープで仮留めする

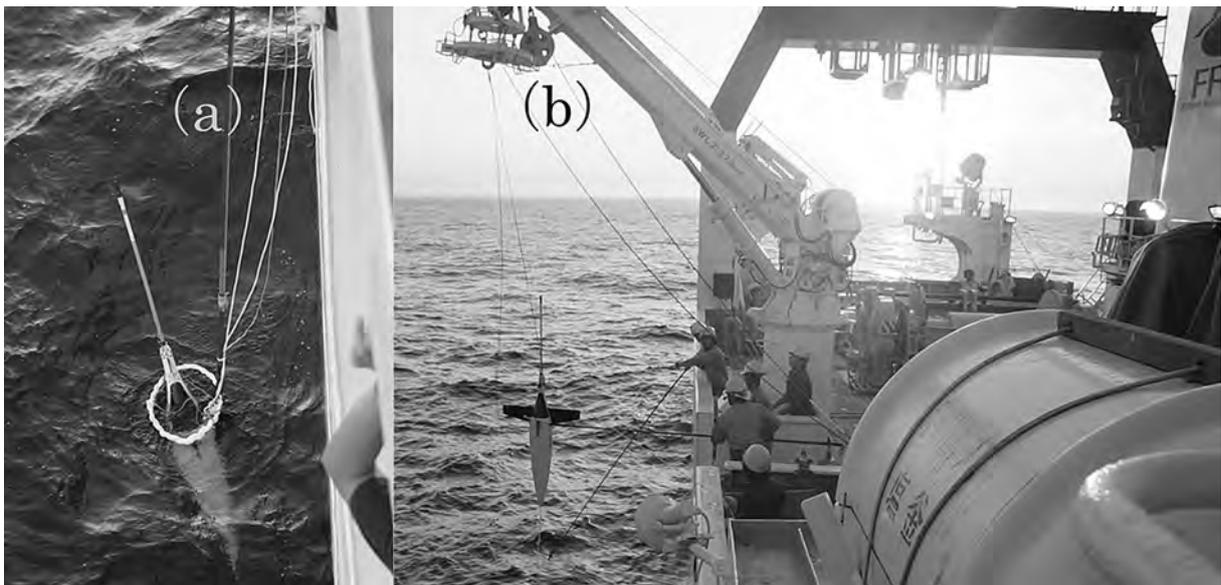


写真7. 若鷹丸から Seaglider の直接回収（2015年7月）
(a) 写真6で示した水中グライダー回収用棒を用いて Seaglider 浮上部の本体尾部に輪を掛けた状態, (b) 捕縛後にクレーンで引き上げ船内に回収する様子

当機構が開発した水中グライダー運用に関わるシステム

水中グライダーは、Slocum, Seagliderともに移動速度は1ノット以下であり、その移動能力は高くないため、海流によって流されやすい。また前述のように予期せぬ故障などが起こり回収しなくてはならなくなる可能性もある。したがって、調査航海のない期間に陸上からオペレーティングする際にも、その動静を常に監視する必要がある。

Seagliderによる観測時には、バッテリーの残容量など機体の状態や最新の浮上位置、観測結果が陸上に設置したデータ送受信サーバーに送られてくる。オペレーターはこれらの受信データをチェックし、ミッションの変更や異常への対応の必要があれば、上記サーバーに、変更したい様々なパラメーターを記した設定ファイルをアップロードする。主なパラメーターは、本体の制御に関わるもの（潜行深度、浮袋の膨張・収縮率、ピッチ・ロール姿勢など）、浮上目標位置、浮上頻度、搭載センサーの動作設定などである。水中グライダーの電力消費量は上記のパラメーター設定に依存するため、設定には電池の残容量を考慮する必要もある。水中グライダーは、次の浮上時にこの設定ファイルを受信し、その後の動作を変更する。

当機構では、受信データを変換し、インターネットを通じて、パソコンやスマートフォンなどのモバイル端末からも水中グライダーの状況を確認できるようなシステムを開発した（図3）。このシステムの開発によって、オペレーターはインターネットが通じる環境にさえ居れば、

頻繁にデータ送受信サーバーにアクセスすることなく状況を確認し、必要に応じてコマンドを送ることができるようになった。本システムが表示する内容は、水中グライダーの航跡、各センサーの観測プロフィール、主要なパラメーターのリストなどであるが、詳しくはSeaglider SG552, SG572それぞれ水産研究・教育機構（2016a, 2016b）に記されている。

また、当機構における水中グライダー観測データの有効活用法の一つとして、当機構が運営している海況予測システムFRA-ROMS（水産研究・教育機構, 2016c）に水中グライダー観測データを導入し、FRA-ROMSによる海況の再現と予測精度の向上を図ることを考えた。そのため、Seagliderの水温、塩分観測データを国際気象通報の一つであるTESAC（気象庁2016）の様式に変換し、FRA-ROMSに配信するシステムを開発した（図3）。本システムについては、今後の展望を交えて後述する。

当機構における水中グライダーの今後の活用法

前述の通り、当機構では、水中グライダーの実用化に向けて、試験とトラブルシューティングを行い、新たなシステム開発も行った。ここでは、水中グライダーの特性を考慮しつつ、海況情報発信の高度化および水産海洋研究の推進の面から、当機構における水中グライダーの今後の活用法を述べる。

FRA-ROMSを介する場合 2012年5月に運用を開始した海況予測システムFRA-ROMSは、データ同化モデルと海洋大循環モデルから成り、当機構が実施してい

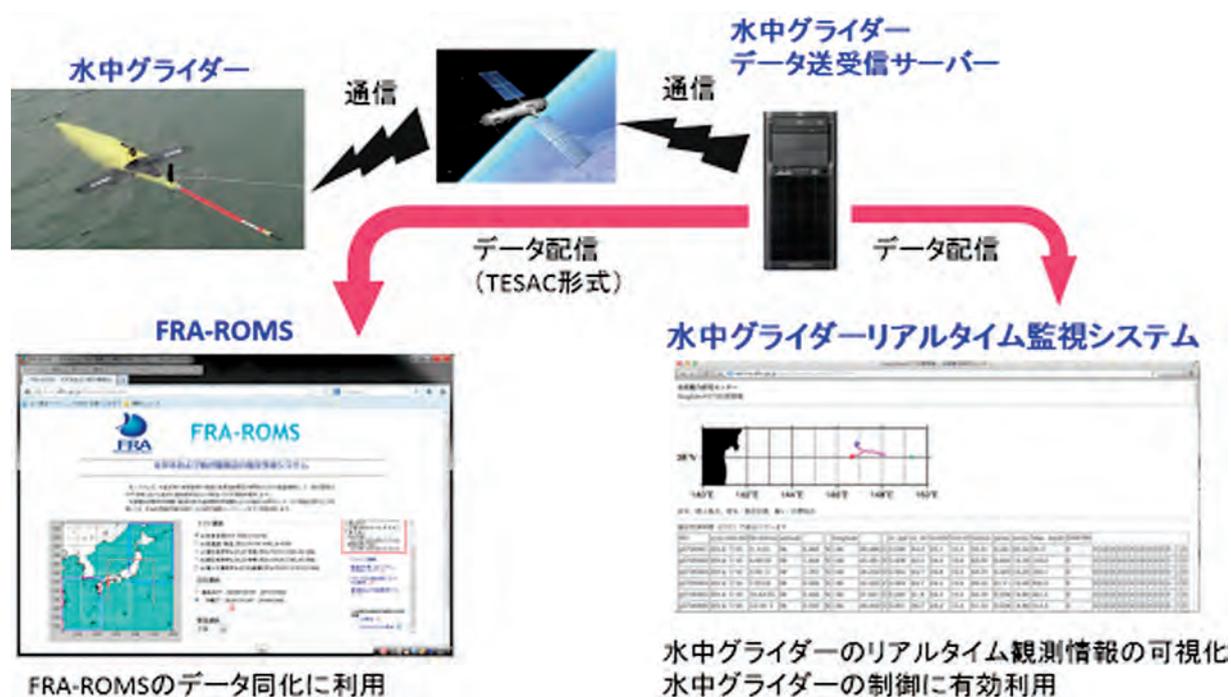


図3. 当機構が開発した水中グライダー監視・FRA-ROMSへのデータ配信システムの概念図

る北西太平洋海域での漁海況予測（水産研究・教育機構 2016d）や浮魚等の卵稚仔輸送実験など水産海洋研究の推進においては欠かせないシステムである。FRA-ROMS には人工衛星による海面高度や海面水温の観測データに加え、世界気象通信網 GTS を通じてアルゴフロートや観測船により提供される水温、塩分のプロファイルデータが入力され、同化モデルによって大循環モデルの修正が行われ、予測計算のための初期値（現況再現値）が作成される。データ不足の海域では大循環モデルの出力がほとんど修正されないため、より現実的な現況再現と正確な予報を行うためには、入力データに空白域や空白期間をなるべく少なくする必要がある。

水中グライダーは調査航海のない期間においても陸上から操作でき、遅いながらも水平方向に移動が可能なことから、FRA-ROMS に入力するデータの空白域・空白期間を埋めるためのデータ取得に利用することが期待できる。そこで水中グライダーの観測データを FRA-ROMS に配信するシステムを用いて、海況の再現性が向上されるかどうかを確認した。ここで、東北太平洋側海域の漁業に大きな影響を及ぼす親潮第 1 分枝の再現性に与える水中グライダー観測の効果を調べるため、例として東北水研が 2015 年 5 月～7 月に行った北緯 38 度線、東経 143 度線上の Seaglider 観測データ（表 2）を用いて再現性向上の効果を検証した。この観測では、北緯 38 度、東経 146 度付近で Seaglider SG552 を投入し、北緯 38 度上を西進させた後に東経 143 度上を北緯 41 度まで南北に往復させた（図 4（b）の東北沿岸側の航跡）。例えば 2015 年 5 月 21 日における FRA-ROMS 再現値の北緯 38 度線の断面を見ると（図 5）、Seaglider 観測データを入力した場合、中層に低温・低塩分で、水温と塩分の等値線が谷状の構造となっている水塊が再現されていることが分かる。水温と塩分の等値線が谷状の構造を取ると、密度の等値線も同様の構造を取り、海洋物理学上、

周囲より低い渦位を持った渦と判断される。渦位とは海水の持つ角運動量を意味し、中深層においては近似的に保存量と扱うことができるため渦の起源や循環を推測するのに用いられるが、東北地方太平洋側では岸沿いに中層で低渦位の冷水渦（オホーツク海起源）と高渦位の冷水渦（北太平洋亜寒帯循環起源）が交互に列状に存在し（Shimizu *et al.* 2001）、親潮第 1 分枝の南下をより現実的に数値モデルで再現するためには、特にオホーツク海系低渦位水の存在が必要不可欠であることが知られている（Tatebe and Yasuda 2004）。本稿の趣旨と異なるため詳しい解析結果は省くが、FRA-ROMS による親潮第 1 分枝の再現性と予測精度の向上には東北太平洋側沿岸～近海域でより多くの観測データの入力が必要であり、特に親潮第 1 分枝が南下する春季において、本海域で水中グライダーの運用をすることは海況予測の精度向上のために有効であると考えられた。

このように、水中グライダーの活用法として FRA-ROMS 再現性と予測精度向上のためのデータ提供が挙げられる。FRA-ROMS に入力されている現場観測データ数の変化（図 6）を見ると、その現場観測データ数は Argo フロートデータが多くを占めるが、都道府県水産試験研究機関の観測データは、その収集ツールである FRA-Uploader（清水ら 2007）が導入された 2007 年に増加が認められる。その後も当機構所属の漁業調査船の TESAC 通報自動化の促進、非海洋研究者への TESAC 通報への協力依頼、Argo フロートデータの増加などを通じて、年々変化はあるものの FRA-ROMS 入力データは長期的に増加傾向にあり、2005 年に比べると常時 2 倍程度のデータ数が得られている。その中で、2015 年に導入した水中グライダーおよび Underway CTD（航行する船舶からセンサー部を曳航し高頻度で高品質な水温、塩分データの取得を可能とする米国オーシャンサイエンス社製のシステム）のデータも同年においては入力デー

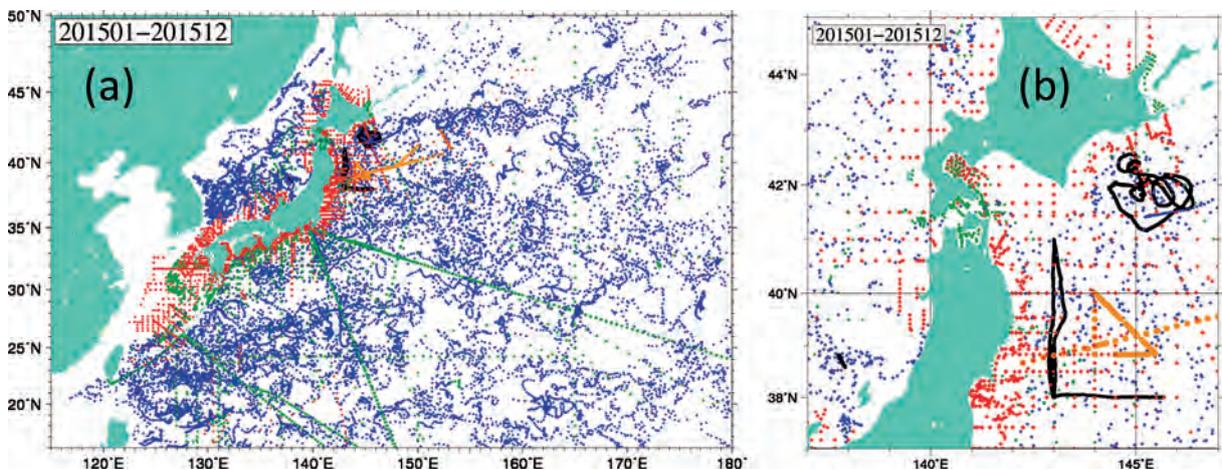


図 4. 2015 年 1 月～12 月までの FRA-ROMS 入力現場観測データの分布 ((a) 日本周辺域, (b) 北海道～東北沖合域) 黒点は Seaglider SG552 および SG572, 赤点は当機構および都道府県水産試験研究機関調査船, 緑点はそれ以外の調査船, 青点は Argo フロートによる観測点, 橙点は東北水研実施の Underway CTD 観測点をそれぞれ示す

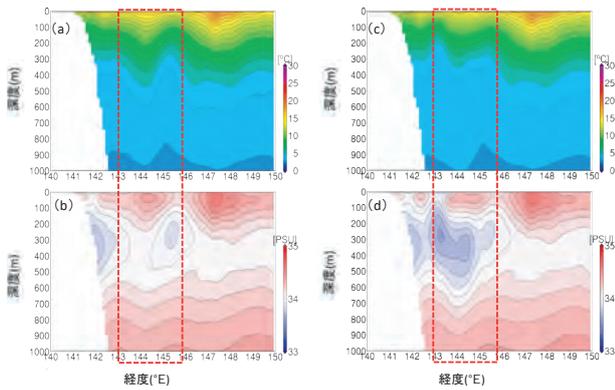


図5. 北緯38度線上のSeaglider SG552の観測データを入力しない場合((a)水温,(b)塩分)と入力した場合((c)水温,(d)塩分)それぞれにおける2015年5月21日のFRA-ROMS再現結果
赤い破線の枠は、Seagliderが観測した領域を示す

タの一角を占め、今後のFRA-ROMS運用に対する水中グライダーやUnderway CTDの貢献にも期待がかかる。一方で、これらの観測の時空間解像度は通常の調査船観測のものよりもずっと高いため、通常の調査船観測の解像度に合うように調整されている現在のFRA-ROMSの時空間解像度に合わせた効果的な運用の仕方、過剰な入力データのフィルタリングなどを今後は検討する必要もある。また、数値モデルが高解像度化された時には、その検証用にもこれらを利用することが可能かもしれない。

調査船モニタリングの補完と直接の情報提供 多くの浮魚類の漁場位置は、水温や水塊間フロントなど海況条件に大きく左右される。また当機構などの水産資源調査においても、例えばマサバ太平洋系群春季初期調査や日本海スルメイカ幼魚調査などでは、水塊配置に応じた調査もなされている。水中グライダーを調査船観測の補強や調査航海のない時期・海域のモニタリングに用いることで漁場や調査ポイントの探索効率が大きく向上すると考えられる。この場合、漁業者や調査担当者は現場観測値をなるべく迅速かつ正確に知りたいという要求があると考えられるため、水中グライダーの観測値をリアルタイムで分かりやすく提供することが重要であろう。

水産海洋研究への応用 水中グライダーの長所を利用した水産海洋学的研究の可能性も大いに考えられる。海外では、大西洋での基礎生産の見積り(Hemsley *et al.* 2015)や混合層深度と植物プランクトン量変化の関係説明やブルーム発生過程の観測(Thomalla *et al.* 2015)などにも水中グライダーが利用されており、当機構でも、2015年3月～5月に北海道南東沖においてSeaglider SG572を用いた親潮春季ブルーム観測を実施した(表2, 図4における北海道南東沖の航跡)。本稿の趣旨と異なるため詳しい解析結果は省くが、当該観測によって親潮域春季ブルームの発生・終息過程の新たな側面が見出されており、その成果はいずれ公表される見込みである。

水中グライダー運用における注意点, 未解決の課題

最後に、2007年から開始した当機構における水中グライダーの試験と運用を通じて得られた注意点、未解決の課題を以下に挙げたい。

水中グライダーの速力の低さについて 水中グライダー移動速度は1ノットに満たないため海流に流されやすい。太平洋の日本周辺沖合には親潮、黒潮のほか暖水塊や冷水渦など1ノットを超える流れを持つ海流や水塊が多数存在することから、これら強流域での運用はなるべく避けるか工夫をしたほうが良い。

機器の故障と緊急回収体制 これまでSlocum, Seagliderともにセンサーや本体の異常によって、移動能力を失ったため調査船などで緊急回収している。当機構では、日本周辺域で調査船・用船などを用いた調査・観測を実施しており、調査前に水中グライダーの投入も含め調査概要を事前に漁協や自治体、海上保安庁など関係団体には周知しているが、水中グライダー運用中に異常を生じて移動能力を失った時には関係団体にその旨を通達し、近傍を調査している調査船が回収できるように連絡体制を敷く必要がある。

オペレーション体制 水中グライダーを陸上から操作しながら長期間運用する場合には、異常事態の発生に備え

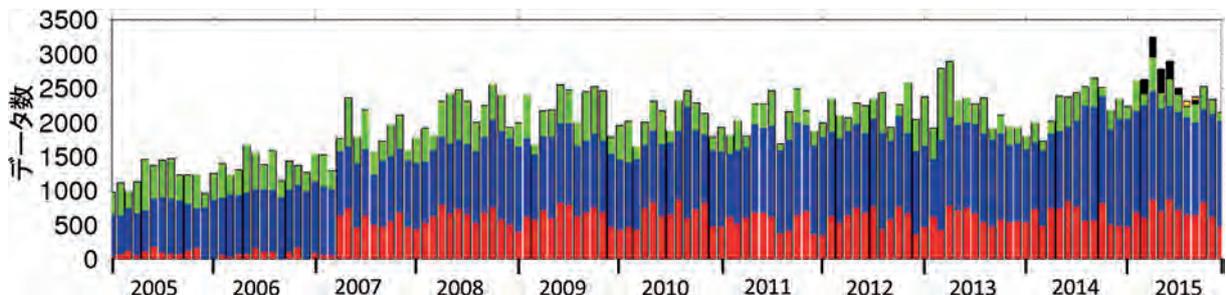


図6. FRA-ROMSに入力されている現場観測データ数の推移(2005年～2015年)
赤は当機構および都道府県水産試験研究機関調査船、緑はそれ以外の調査船(表層漂流ブイ観測データ等を除く)、青はArgoフロートによる観測によるもの、黒は東北水研水中グライダーSeaglider SG552およびSG572、橙は東北水研Underway CTDそれぞれの観測によるものを示す

て常時監視する必要がある。オペレーターは、水中グライダーの特性やコマンドを理解し、その状況に応じて適切にコマンドを送信する必要がある。オペレーターの負担を考えると複数の人数が必要であるため、オペレーターの育成が必要である。また、今後は投入・回収以外のオペレーティングを日本代理店などの業者に委託することも検討したほうが良いのかもしれない。

損害保険について 水中グライダーは高額な機械であるため、亡失をなるべく避けなければならないが、予想外の事態で亡失する可能性も捨てきれない。当機構では、現在、運用前に本体に対して損害保険を掛けているが、今後、長期間の運用に備えて、本体の損害保険を年契約にするなどの事務手続きの簡素化も検討したほうが良い。一方で水中グライダーが漁具に引っかかるなどの漁業被害を与えた場合の漁業補償については、現状で補償されるような契約は締結していない。前述の通り、漁場周辺で水中グライダーを運用することは今後期待される運用法の一つであるが、不運にも漁業者の操業に悪影響を及ぼすようなことになった場合の補償手段についても考えておく必要があろう。

文 献

- 1) Hemsley V S, Smyth T J, Martin A P, Frajka-Williams E, Thompson A F, Damerell G, Painter S C (2015) Estimating Oceanic Primary Production Using Vertical Irradiance and Chlorophyll Profiles from Ocean Gliders in the North Atlantic. *Environ. Sci. Technol.* 49, 11612-11621.
- 2) 伊藤進一, 有馬正和, 市川雅明, 青木茂, 奥西武, 笥茂穂, 長谷川大介, 和川拓, 安田一郎, 田中雄大, 黒田寛, 清水勇吾 (2016) 水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性. *沿岸海洋研究*, 53, 125-133.
- 3) 気象庁 (2016) 海洋観測データの収集について. <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/exchange/index.html>, 2016年7月5日 (閲覧日).
- 4) 那須司, 増田紳哉, 全国水産場長会 (2011) 漁海況モニタリング体制の現状について (アンケート調査から見えてくるもの). *日本水産学会誌*, 77, 727-732.
- 5) 水産研究・教育機構 (2016a) Seaglider#552 位置情報. <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/kaiyo/kaiyoubu/glider/sg552.html>, 2016年7月5日 (閲覧日).
- 6) 水産研究・教育機構 (2016b) Seaglider#572 位置情報. <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/kaiyo/kaiyoubu/glider/sg572.html>, 2016年7月5日 (閲覧日).
- 7) 水産研究・教育機構 (2016c) FRA-ROMS 太平洋および我が国周辺の海況予測システム. <http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/index.html>, 2016年7月5日 (閲覧日).
- 8) 水産研究・教育機構 (2016d) わが国周辺の水産資源の現状を知るために. <http://abchan.fra.go.jp/>, 2016年7月5日 (閲覧日).
- 9) 清水学, 小松幸生, 植原量行, 伊藤進一, 角田智彦, 瀬藤聡, 日下彰, 笥茂穂, 宮澤泰正, 平井光行 (2007) FRA-JCOPE のデータ流通および利益還元システム. *黒潮の資源海洋研究*, 8, 35-40.
- 10) Shimizu Y, Yasuda I, Ito S (2001) Distribution and Circulation of the Coastal Oyashio Intrusion. *J. Phys. Oceanogr.* 31, 1561-1577.
- 11) Tatebe H and Yasuda I (2004) Oyashio Southward Intrusion and Cross-Gyre Transport Related to Diapycnal Upwelling in the Okhotsk Sea. *J. Phys. Oceanogr.* 34, 2327-2341.
- 12) Thomalla S, Racault M F, Swart S, Monteiro P M S (2015) High-resolution view of the spring bloom initiation and net community production in the Subantarctic Southern Ocean using glider data. *ICES Journal of Marine Science* 72. DOI: 10.1093/icesjms/fsv105, 2016年7月5日 (閲覧日).