

# 水産資源モニタリング手法の現状と今後の展望

公益財団法人笹川平和財団海洋政策研究所 研究員 朱夢瑤

## 1. はじめに

近年、水産資源の危機という言葉がよく聞かれる。国連食糧農業機関（FAO）の2018年度世界漁業・養殖業白書(SOFIA)によれば、海洋水産資源は「適度または低・未利用状態」の割合が減少し、わずか7%となる一方で、「満限利用状態」が60%、「過剰利用または枯渇状態」が33%へと、それぞれ増加している。また、水産資源の変動に大きな影響を与える要因として、過剰漁獲に代表される人間活動と気候変動が挙げられる。これらの要因のうち、人間活動はある程度コントロールできる要因であるが、気候変動が水産資源に与える影響を複雑なメカニズムを持つため、正確に把握することは非常に難しい。さらに、水産資源は常に変動し、それ自体に不確実性も存在する。水産資源の持続的利用のためには、水産資源の実態を常に把握またはモニタリングする必要があると考えられる。ここでは、水産資源や海洋生物のモニタリング手法の現状をレビューし、各手法の特徴を総括することで、今後水産資源に向けたモニタリング手法の改善に貢献したい。

## 2. 各モニタリング手法の現状

### 2-1 漁業統計資料

漁業統計資料は主に、漁業活動から得られた魚種別、漁業種別、海域別の漁獲量(catch)と漁獲努力量(fishing effort: 漁船の隻数、操業回数、曳網時間など)に関する情報である。漁業は悠久な歴史を持つ人間活動であるため、特に先進国では長年にわたる漁業統計資料が蓄積されてきた。例えば、日本では1894年にすでに水産事項特別調査という統計資料が発刊された<sup>1</sup>。これは、日本最初の漁業センサスともいえる資料である。

これらのデータ情報によって資源密度を表す相対的な指数－単位努力量あたり漁獲量(catch per unit effort: CPUE = catch/effort)－が得られる。CPUEは容易に計算できるため、資源状況を把握する重要な指標の一つとして利用される。しかし、CPUEは資源密度以外に、魚の分布や操業季節、操業漁具の差異などの要因からの影響も受ける。このため、CPUEの標準化手法や、絶対的な資源量を推定する解析方法が発展してきた。例えば、年齢情報(年齢別の漁獲量)を利用したコホート解析(virtual population analysis: VPA)や(市野川, 岡村, 2014)、資源評価モデルの一種となる状態空間モデルの開発などである(岡村, 市野川, 2016, Zhu et al., 2017)。

膨大なデータ情報を低コストで提供できるうえ、さまざまな解析方法が開発されたため、漁業統計資料は簡便な水産資源モニタリング(評価)手法として広く使用されてきた。しかし、漁獲努力量の定量化が必ずしも容易でないことや、厳しい漁業規制の適用による休漁、漁場の偏り、漁場外・漁期外の漁獲情報の欠如などが漁業統計資料の欠

<sup>1</sup> <https://www.stat.go.jp/library/meiji150/shiryo/shiryo28.html>

点として、水産資源を評価する際に、バイアスを生じさせる原因となる。そのため、漁業から独立した水産資源のモニタリング手法が必要となる。

## 2-2 採捕を伴う水産資源調査（試験的な漁業調査）

漁業統計資料は操業する漁業の実態によりバイアスが発生する。このため、魚種別の分布の特徴や加入動向などに関する重要なモニタリング情報を直接、取得・提供できる採捕を伴う水産資源調査が必要とされる。日本では、水産研究・教育機構をはじめ各都道府県の水産試験場や民間調査機関などによって、調査船を用いた科学的な漁獲調査が実施されている。調査海域に設けられた観測点において、一定期間内に一定の漁具を用いて漁獲調査を行うことによって、対象資源の分布や加入状況などを把握するほか、各観測点における対象資源の数（密度）を求め、それを基に資源量を推定する。これらの調査では、対象資源の特性に応じて調査海域や調査期間、調査する際に使用する漁具（採取器具）が決定される。トロール網、かご網、流し網、定置網などの漁具が使用されるが、なかでもトロール網が定量的調査に最もよく使用される。例えば、定量的機能を持つフレームトロール（Framed Midwater Trawl : FMTなど；宮下，2016）では、採集効率を考慮することで調査海域における資源の現存量を比較的正確に推定することが可能であり、プランクトンから魚類までの調査に幅広く使用されている（板谷等，2009；Oozeki, et al., 2012）。トロール調査は、網を曳網する深度によって、表層トロール調査、中層トロール調査、着底トロール調査に分けられる。

通常、調査船での漁獲調査と同時に、資源変動メカニズムの解明等に利用される水温、塩分、プランクトン等の海洋環境要因の調査も実施される。日本では、周辺海域で定期的な海洋環境調査が60年以上にわたって継続され、水産資源研究にとって大量かつ貴重なデータ情報が蓄積されている<sup>2</sup>。

しかし、一回の調査船調査では限られた海域・時期における情報しか得られないため、広域な海域を連続的に観測するには、複数の機関による調査協力体制の構築・維持や継続的な予算の確保が必須である。水産資源、海洋環境ともに、数年から数十年の時間スケールで変動するため、資源調査は広い海域で継続して行うことによって、はじめてその役割を果たすことができる。水産資源の動向を正確に把握するためには、漁業から得られた情報と調査船調査から得られた情報をバランスよく利用することが重要である（Zhu et al., 2018）。

## 2-3 卵稚仔調査

魚類の産卵場、産卵期、卵や仔魚の発生状況などを把握することを目的に、世界各国で卵稚仔調査が行われている。総産卵量の推定結果を用いて資源量（産卵親魚量）を推定する卵数法（Egg Production Method : EPM）は、漁業から独立した水産資源モニタリング手法として広く使われ、特に小型浮魚類の資源評価のための資源量指標値のひとつとして用いられている（Lasker, 1985；大関, 2010）。卵稚仔調査では、調査海域内に設けられた複数の定点において、プランクトンネットや魚卵採集装置（Continuous Underway Fish Egg Sampler : CUFES）などを用いて卵や仔稚魚を採集し、種の分類、量の把握などを行う（Checkley et al., 1997；大関, 2010）。日本では1945年以降、マイワシやサバ類などの小型浮魚類を主な対象とした卵仔

<sup>2</sup> <https://www.fra.affrc.go.jp/bulletin/news/fnews56.pdf>

稚調査が実施され、さらに1978年以降は、国立の水産研究所や全国の都道府県水産試験場等の協力体制のもとで、日本周辺水域の卵稚仔調査が継続的に実施されてきた（大関,2010）。

卵稚仔調査は漁業情報に依存することなく科学的・系統的な調査によって水産資源の動向を直接、把握することができるが、卵の種同定が可能であることが前提となるほか、産卵場全域での大規模な調査が必要となるため、調査コストが非常に高い。このため、国や海域によっては、重要経済魚種の主産卵期にのみ実施する場合も多い。

## 2-4 目視調査

クジラやイルカなどの海洋表層に遊泳する海洋生物に対して、目視調査でその資源動態を推測することが可能である。目視調査を行うにあたって、調査コースや調査地点の設定は最初の最も重要な作業であり、対象生物に関する予備調査や過去のデータ情報を参考に調査設計することが望ましい（宮下, 2004）。通常、設けられた調査コースに調査船や航空機を運航させ、目視観測で対象生物が観測された日時、発見場所、種名、発見距離などのデータ情報を記録し、以後の資源量推定に使われる（Barlow, 1999）。また、河川や沿岸の浅海における水中生物の現状を調べるため、水中カメラや水中ビデオが使用されるほか、潜水による目視調査が実施される（Masuda, et al.,2016）。

目視調査は鯨類の資源量調査によく使われるほか、海岸に上陸産卵するウミガメや、産卵のために河川に遡上するサケマス類の調査にも使用される（虎尾, 2017）。しかし、目視調査は、限られた海洋生物にしか利用できないうえ、多大な労力と高度な知識を持つ専門家が必要となる。また、昼間の観察しか行えないことや、観測海域に偏りがあること、対象生物が遠距離に位置する場合に種判別を誤っている可能性があることなどの問題を抱えている。

## 2-5 標識放流調査

標識放流調査は古くから行われ、16世紀にはすでにサケにリボンをつけて放流した記録がある。日本では1917年に北海道水産試験場が石狩川で秋サケに対して行ったのが最初である（Kurogane,1963）。標識放流調査は、対象生物に標識（タグなど）を装着して海や川に放流し、再捕する際に得られる位置や数、年齢などの情報によって、対象生物の移動、回遊経路、成長、産卵場、系群、資源量など多岐にわたる項目を推定する目的で実施され、水産資源の研究や管理を推進する科学的根拠を提供する重要なモニタリング手法として広く使われてきた。また、比較的安価な調査コストで行えるため、現在はマグロ類、ブリ、カレイ類、カニ類、クジラ類、エビ類、イカ類などの多くの水生生物に対して、水産研究・教育機構をはじめ、都道府県水産試験場などによって継続的に実施され、水産資源研究に大きく貢献している。

しかし、標識放流調査の結果は、再捕される標識個体の情報に依存する。このため、標識による死亡や標識の脱落、再捕された個体の不完全報告などによって再捕率が低い場合には、調査結果にバイアスが生じうる

（Kurogane,1963 ; Jepsen. et al.,2015）。また、通常のアンカータグによる調査では、標識個体の放流時点と再捕時点の情報しか得られないため、途中の履歴が不明である（宮下, 2016）。さらに、標識放流調査は対象生物の情報のみに限定され、海洋生態系の全体像を効率的に把握することが困難であるという欠点がある。

## 2-6 バイオロギング

バイオロギングとは、バイオ（生物）とロギング（記録する）という言葉を組み合わせた学術用語であり、人の視界や認識限界を超えた環境において、人の代わりに動物目線から観察したデータを活用するという発想から生まれた研究手法である。具体的には、動物に各種の装置を装着してデータを収集することで、生物の行動や周辺環境状況などを把握する計測手法として実施される。

研究目的や対象生物によって、取り付ける装置は主にデータ蓄積型とデータ発信型に分かれる。前者は各種のセンサーを搭載した記録計（データロガー）を対象生物に装着し、データを記録した後に回収することによってデータを取得するものであり、後者は電波や超音波発信機を対象生物に装着し、遠隔的に生物の行動や環境の情報を得るものである（Bograd, et al., 2010; Williams, et al., 2019）。発信型は特に生物の移動や分布、生息域の調査に適し、発信機からの信号を受信機より受け取り、リアルタイムでデータを取得可能である。しかし、電波や超音波は送信できる情報量が限られ、蓄積型と比べて利用できるセンサーの種類や取得できるデータの量が少ないという欠点もある(Williams, et al., 2019)。

近年は技術進歩によって装置の小型化が進み、装着できる対象が大型生物から海鳥や小型魚類にまで広がったうえ、多様なセンサーも開発され、様々な対象生物から豊富なデータを収集することが可能となっている。加速度センサー、プロペラセンサー、温度センサー、光量センサー、圧力センサーや磁気センサー、そして画像や音響情報を記録できるカメラやビデオなどを対象生物に装着することで、生物の潜水や索餌行動などのメカニズム、体温や心拍数などの生理的状態、群行動や親子関係などの社会的行動など、さまざまな項目に関する情報を得ることが可能である（宮下, 2016 ; Yoda, 2018）。計測動物の行動からその動物が経験した周辺環境の情報を得ることも可能であるため、バイオロギングの情報を海洋や気象予測にも活用できる可能性がある。例えば、海上の風向・風速の推定に海鳥の飛翔データを利用したり（Yonehara et al., 2016）、複雑な縁辺海の海水温の変動予測にウミガメ由来の観測データを利用したりする（Doi et al., 2019）などの研究例が挙げられる。さらに、バイオロギングによって魚類の行動を解明することは、水産資源管理のための重要な知見を提供する。例えば、バイオロギングを用いてヒラメの遊泳行動を調査した結果、漁獲率はその遊泳行動の季節変化に大きく影響されることが判明し、漁獲データのみでは最終的にヒラメの資源量を過大・過小評価する可能性が高い（河邊, 2009）という研究成果が得られた。

以上のように、バイオロギングは様々な用途で幅広い研究分野に応用され、生物や環境の観測手法として、その発展性が期待されている。しかし、得られるデータが対象生物の生息域に限定されること、一つの記録計から単個体の情報しか入手できないこと、記録計が高価であること、蓄積型装置の回収率が低いこと、信号を受信しないとデータが得られないこと、受信範囲が受信機の数に依存すること、センサー、記録計、発信機の脱落が生じることなどの問題を抱えている。

## 2-7 音響リモートセンシング

水中において、音波は光や電波よりも格段に減衰が小さく、はるか遠くにまで届く性質があるため、音響は遠隔的な海洋生物の調査（音響リモートセンシング）に広く活用されている。音響リモートセンシングは、調査方式によって主に能動的手法と受動的手法に分類される。



## (1) 能動的音響調査

能動的音響調査とは、超音波を水中に発射し、生物から反射した音の強さや、反射音を捉えるまでの時間を測定することで、海洋生物の出現位置や状態を把握する手法である。この調査により、対象生物に関する資源量やサイズ、分類群または種などの生物情報が推測できる。これらの生物情報を推定するため、対象種の音波散乱強度となるターゲットストレングス (Target Strength: TS) の測定が必須である (安部, 2010 ; 甘糟, 2019) 。TSは魚の体長、姿勢分布、鰾などによって変動するが、特に主要な音波散乱部位である鰾の有無とサイズ、形状に大きく左右される (甘糟, 2019) 。TSの変動は資源量推定の際の大きな誤差要因となるため、TS測定方法を高精度化することが望ましい。

水産資源を音響調査する際に最も使用されている水中音響機器は計量魚群探知機 (計量魚探) であり、特にスケトウダラなど中底層性魚類の資源調査で活用されている。計量魚探は下向きの鋭いビームを使用するため、海面付近の探知が難しく探査範囲が狭くなり、表層魚群や遊泳速度の速い魚に対しての計測が難しい。また、調査船の航走雑音に対し、浮魚類は調査船から逃避する恐れがあるため、資源量推定の信頼度が低下するという課題があった。これに対して、音響ビームを水中で水平方向に広範囲に発射して周囲を高速に探査できるスキャニングソナーが開発された。スキャニングソナーでは魚群の逃避行動の影響を受けずに探査することが可能であり、計量魚探と比べて探査範囲が飛躍的に拡大する。

音響技術の発展により、新たな水中音響機器が次々と開発された。例えば、海底の状況を立体的に把握できるマルチビームソナーの開発<sup>3</sup>や、音響画像を高フレームレートでリアルタイムに出力可能である音響ビデオカメラ (イメージングソナー) の開発など (水野, 2019) である。音響調査は水産資源の把握に利用されるだけでなく、生態特性などの可視化にも利用される (宮下, 2019) 。例えば、被食-捕食の時空間的な関係の可視化や、対象生物に対する昼夜分布や季節分布の違いの可視化など (Miyashita, et al., 2004) が挙げられる。さらに、音響モニタリングにより、沿岸生態系の機能を維持する藻場の時空間的な分布などを迅速かつ定量的に可視化することも可能である (Shao, et al., 2017) 。

能動的音響調査は比較的広域に利用可能であるが、他の手法に比べて種同定が困難であることが課題として認識されている。孤立した魚群や、サイズや形状を急激に変化させる魚群などを対象とした音響調査では、バイアスが生じやすい。音響調査する前に、調査海域や対象生物などに関する知見を生物採集、環境調査などによって事前に把握する必要がある。また、一回の調査で限定された情報しか得られないため、それだけでは資源動態の全体像を把握することが困難である。

## (2) 受動的音響調査

鯨類をはじめ、魚類や甲殻類などいくつかの海洋生物は、仲間とのコミュニケーションや、敵への威嚇などさまざまな用途で音を発していることが知られている。また、海洋生物の発する音には種による違いがある。そのため、これらの音は、その存在や行動、資源量などの生態学的な指標として利用できる可能性がある (Lin, et al., 2018) 。受動的音響調査は、この音を利用する一つの海洋生物観測手法である (Mellinger, et al., 2013) 。

具体的には、観測定点で水中マイクロホンなどを設置し、水中の音を連続的かつ広域的に録音する。その後、事前に把握した種ごとの音声の特性を参照し、マイクロホンより得られた水中音データから特定の生物の音を分離・判

<sup>3</sup> [https://ideacon.jp/technology/inet/vol42/vol42\\_new02s.pdf](https://ideacon.jp/technology/inet/vol42/vol42_new02s.pdf)

別・解析することにより、観測地点における海洋生物の種類や位置、行動、個体数などの情報を推測する (David, et al., 2007)。従来、受動的音響調査では定性的な情報しか得られないと考えられてきたが、音響的二重独立再捕法や点音源密度推定法などの方法の開発に伴って、定量的な推定 (密度推定や分布地図の作成など) も可能になった。例えば、音響的二重独立再捕法を用い、観測地点周辺におけるイルカの生息数を推定することが可能である (Kimura et al. 2014)。

地震や津波を観測するため、日本周辺海域の海底ケーブル観測システムが発達している。これらの観測システムにはハイドロフォンが搭載され、長期的な音響観測データが蓄積されてきた。既往文献によると、海底ケーブルで集められた水中音からヒゲクジラ類やマッコウクジラなどの鳴音が抽出され、これらのクジラの出現動態、位置などが可視化された (Iwase, 2008)。このように、巨大な地震や津波の海底観測網を活用することで、広範囲に移動するクジラ類を長期連続モニタリングできることが期待される。

生物音を利用する受動的音響調査は、魚類から海産哺乳類までの大型海洋生物の音響的遠隔観測手法として、非致死的に対象生物の情報を得ることが可能であるという利点がある。仮に、海洋に広範囲で音響センサーを密に配置することができれば、海洋生物の生態動態から資源量までを可視化できる可能性が考えられる。しかし、海洋生物の音声はごく一部の種でしか同定されていないため、生物種の音声データベースはまだ不完全である。実用化のためには、音響データから雑音を取り除き、目的とする信号を取り出す技術の向上によって、種判別精度を一層向上させる必要がある。

## 2-8 環境DNA分析

水中、土壌中、空気中などの環境中には、そこに生息している生物由来のDNAが存在する。そのようなDNAを総称して環境DNA (environmental DNA : eDNA) と称する。近年の技術進展に伴い、微量な環境DNAを容易に検出することが可能となった。DNAの配列は種特異的であるため、環境DNAを分析することで、そこに生息する生物群に関する様々な情報の取得が可能になった。河川や海洋で採取した水試料に存在する環境DNAを解析することで、その水域における水棲生物の在・不在や種組成、バイオマスの多寡などを推定することが可能である (Ficetola et al., 2008; Matsubashi et al., 2016)。

通常、環境DNA調査の手順としては、観測水域から採水し、採取した水試料をフィルターなどによって濾過し、DNAを濾紙に捕集した後、濾物からDNAを抽出し分析する (高原 et al., 2016)。分析する際に、大きくわけて種特異的な検出と、メタバーコーディング (多種同時並列解析法) の2つの方法がある。前者は、種特異的なプライマーを使ったポリメラーゼ連鎖反応 (polymerase chain reaction: PCR) 法を用い、特定の対象生物のDNAを増幅して検出することでその生物の在や不在を推定する方法である (Fukumoto et al., 2015)。後者は、特定の分類群に属する種のDNAをまとめて増幅できるユニバーサルプライマーを用いたPCRを行った後、次世代シーケンサーでDNAの塩基配列を読み取り、データベースと照合することで、分類群に含まれる多くの生物種を網羅的に検出する方法である (Miya et al., 2015)。この2つの検出法にはそれぞれの利点がある。前者は簡便かつ低コストであり、対象とする生物のバイオマスの指標となるデータを容易に取得することができる。後者は解析コストがかかるが、一度に大量のデータが得られ、一度の分析で多種を網羅的に検出することができる。

環境DNA分析は、これまでの目視調査や網などによる捕獲調査、音響調査などの従来の水産資源調査法と比べて、簡便で低コスト・効率的であり、環境にも優しい手法と考えられる。DNA情報から生物種の同定を行うため、形態学的な種同定という複雑な技術を必要としない。また、絶滅危惧種や生息密度の低い種を比較的容易に検出で

きるといふ利点もある（高原et al., 2016）。さらに、作業が簡便で専門技術が不要なことから、調査を長期にわたって継続し易い。このため、時空間的に密な生物情報を得ることが可能であり、ビッグデータを形成する調査方法として活用できる。近年、環境DNA分析に基づく研究は急速に拡大し、魚種の検出、種組成や魚群サイズ（生物量）の把握、魚の回遊経路・産卵場の推定、水産資源量の推定、外来種侵入状況の把握などに関する幅広い研究成果が挙げられつつある（Yamamoto et al., 2017 ; Ushio et al., 2017 ; Takahara et al., 2012; Berry et al., 2019）。

しかし、環境DNAは、水の流れに乗って移流・拡散するとともに、分解にとって減衰するので、水中での存在状態、拡散程度、残存時間などの重要な点については未解明な点も多い。このため、一回の採水調査によって検出できる空間範囲や時間解像度が不明確になりがちである（Yamamoto et al., 2016）。つまり、検出された対象生物由来のDNAが、いつ、どこでその生物から放出されたのか、不明なことが多い。これに加えて、死亡個体由来のDNAも検出できるため、環境DNAの濃度と生物の個体数とは単純な比例関係にはならず、正確に個体数の推定を行うことは難しい。近年、国立環境研究所をはじめとする研究チームが環境DNAの分析に基づいて対象生物の個体数を推定する新手法を開発したが、推定精度は未だ高くないため、さらなる研究が必要と考えられる（Fukaya et al., 2020）。また、環境DNA分析は間接的観測であるため、DNAが検出されても生物群の年齢構成やサイズ構成などの情報を得ることはできない。さらに、DNA情報から種同定がなされるため、さまざまな種の塩基配列情報に関する十分なデータベースの整備が必要となる。

### 3. まとめ

以上のように、水産資源をモニタリングする手法には様々なものがあり、表1のように簡潔的にまとめた。これらの手法を用いて、水産資源の実態を直接的（目視調査やバイオロギングなど）または間接的（漁業統計資料や環境DNA分析など）に観測しようとする調査が、さまざまな機構によって実施されてきた。各手法には、それぞれの利点と欠点があり、単独ですべての必要性を満たす完璧な手法は存在しない。このため、各モニタリング手法の利点と欠点を十分に把握したうえで、目的に応じた特定の手法または最良の組み合わせをもって活用することが求められる。従来から漁業活動の変遷や漁獲量の推移を把握する場合、漁業統計資料は基礎データとして単独で利用するが、資源量を予測するまたは資源変動メカニズムを解明する場合は、漁業統計資料と採捕を伴う水産資源調査とのデータを併用することが望ましい。また、確定した対象生物の生態や行動などをモニタリングする場合、目視調査や標識放流調査、またはバイオロギングといった手法を観測に適するが、広域で多様な生物資源をモニタリングする場合は音響リモートセンシングや環境DNA分析といった手法に適すると考える。採捕を伴う水産資源調査、卵稚仔調査、標識放流調査、およびバイオロギングは対象生物を採捕または直接的に利用することに対して、目視調査、音響リモートセンシングおよび環境DNA分析は遠隔観測または採水することで、非致命的に対象生物の情報が得られ、絶滅危惧種の調査に大きく貢献することが期待される。



表1各水産資源モニタリング手法の比較

モニタリング手法	得られる情報	メリット	デメリット
漁業統計資料	・漁獲量 ・漁獲努力量	・膨大なデータ量、 ・様々な解析手法	・漁場の偏り ・努力量の定量化が困難
採捕を伴う 水産資源調査	・対象資源の分布、 ・対象資源の数(密度)	・過去のデータとの比較が可能 ・サンプルが入手できるため、 様々な科学的調査が可能 ・漁獲統計資料の補足	・調査時期と調査海域に依存 ・広域の調査が困難
卵稚仔調査	・産卵場 ・産卵期 ・卵や仔魚の発生状況	・漁業に依存せず ・科学的調査が可能	・卵の種同定が困難 ・調査コストが高い
目視調査	・対象生物の分布（発見 地点） ・対象生物の数	・科学的調査が可能 ・水中カメラや水中ビデオの使 用可能	・限られた対象生物（鯨類など 海面に浮上するもの） ・多大な労力 ・調査が昼間に限定 ・目視条件による種判別の限 界
標識放流調査	・対象生物の移動 ・回遊経路 ・成長状況 ・産卵場 ・資源量など	・比較的安価な調査コスト ・長年の調査資料の蓄積	・再捕される個体の特性に依存 ・再捕率が低い ・途中の履歴不明
バイオリギング	・動物自身の行動や生態、 生理情報 ・周囲の環境情報など	・様々なセンサーが装着できる ・海洋、水産、気象など多様 な分野に活用	・情報が使用生物の生息域に 限定 ・高価な記録計 ・装置回収率が低い ・受信範囲が受信機の数に依 存など
音響 リモートセンシング (アクティブ・ パッシブ)	・バイオマス ・生物の分布(出現位置) ・環境情報 ・海底の状態など	・比較的広域の調査が可能 ・遠隔的非致死型調査	・アクティブは種同定が困難 ・バイオマスへの換算モデルの構 築が必要 ・パッシブは生物種の音声デー タベースが不完全
環境DNA分析	・魚種検出 ・魚群サイズ ・回遊経路 ・産卵場 ・資源量 ・外来種侵入状況など	・簡便で低コスト・効率的な調 査 ・環境に優しい ・広域的調査が可能 ・時空間的な生物情報が取 得可能	・検出できる空間範囲や時間 解像度が不明確、 ・個体数の推定が難しい ・年齢構成やサイズ構成が不 明など

#### 4. 今後の展望

国連持続可能な開発サミットで採択されたSDGs（sustainable development goals：持続可能な開発目標）では、目標14「海の豊かさを守ろう」を設定し、その中で水産資源の科学的管理というターゲットを掲げている。水産資源を科学的に管理するため、漁獲可能量（TAC：Total Allowable Catch）制度の導入、禁漁区や禁



漁時期の設定、栽培漁業や海洋牧場の開発、水産エコラベルの応用など様々な措置や制度を利用しつつある。これらの措置や制度を定める際に、各モニタリング手法によって水産資源の実態把握がその基礎となる。しかし、現行の水産資源のモニタリング手法はまだ不十分であり、今後さらなる発展や改善することが望ましい。各モニタリング手法のデメリットを分析したうえ、改善できる点に着目し、実行可能な対策案を検討する必要がある。例えば、バイオリギングに装置回収率が低いという欠点に向けて、リアルタイムに遠隔受信によってデータを収集する技術の開発や普及、音響リモートセンシングに向けて生物種の音声データベースの補完、環境DNA分析に向けてDNA濃度に基づく個体数の推定方法の開発などの対策を講じるべきである。一方、水産資源のモニタリングは各公的研究機構によって実施されることが多いが、民間企業や民間団体などと連携することも期待される。例えば、研究機構は民間の船会社と連携し、商船に魚群探知機を装着する、または環境DNA分析のために、商船によって簡便である採水調査を行うことで、より効率的に広域における生物資源の情報が取得可能であり、水産資源をモニタリングする範囲と頻度はより一層増大させることができる。

また、水産資源は環境要因（水温、海流など）によって変動しやすいため、水温、海流、塩分、プランクトン等の海洋環境要因の調査も重要である。これらの調査やモニタリングを通して得られたデータを活用し、水産資源の変動機構を明らかにすることが可能になる。各モニタリング手法により現時点の状態を知り、解明された変動機構により未来の状態を予測し、並行して、過剰漁業を防ぐためにIUU（違法・無報告・無規制）漁業の実態把握を行うことで、水産資源の持続的利用の実現に近づけると考える。今後、海洋生物から海洋環境までの海洋生態系レベルのモニタリングネットワークの構築が期待されると考えられる。

#### 参考文献：

- Barlow, J. (1999) Trackline detection probability for long-diving whales. *Marine Mammal Survey and Assessment Method*, pp:209-221
- Berry et al.(2019), Marine environmental DNA biomonitoring reveals seasonal patterns in biodiversity and identifies ecosystem responses to anomalous climatic events, *PLOS Genetics*, 15(2): e1007943
- Checkley Jr. D. M.,P. B. Jr., Ortner, L. R. Settle and S. R. Cummings (1997) A continuous, underway fish egg sampler. *Fish. Oceanogr.*, 6, 58-73
- D.K. Mellinger and S.L. Heimlich (2013) Introduction to the special issue on methods for marine mammal passive acoustics. *J. Acoust. Soc. Arrt.*, 134, 2381- 2382
- David, K. Mellinger, Kathleen, M. Stafford, Sue, E. Moore, Robert, P. Dziak, and Haru, Matsumoto (2007) An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans, *Oceanography*, 20(4), 36-45
- Ficetola, G. F., C. Miaud, F. Pompanon and P. Taberlet (2008) Species detection using environmental DNA from water samples. *Biol. Lett.*, 4, 423-425
- Fukumoto, S., A. Ushimaru and T. Minamoto (2015) A basin-scale application of environmental DNA assessment for rare endemic species and closely related exotic species in rivers: A case study of giant salamanders in Japan. *J. Appl. Ecol.*, 52, 358-365
- H. Williams, L. Taylor, S. Benhamou, A. Bijleveld, et al., (2019) Optimizing the use of biologgers for movement ecology research, *Journal of Animal Ecology*, 89(1), 186-206
- Iwase R. (2008) Fin whale vocalizations observed with ocean bottom seismometers of cabled observatories off east Japan Pacific Ocean, *Japanese Journal of Applied Physics*, 54,7S
- Jepsen N, Thorstad E, Havn T, Lucas M (2015) The use of external electronic tags on fish: an evaluation of tag retention and tagging effects, *Animal Biotelemetry* 3, 49
- K. Fukaya, H. Murakami, S. Yoon, K. Minami, et al., (2020) Estimating fish population abundance by integrating quantitative data on environmental DNA and hydrodynamic modeling, *Molecular Ecology*, DOI : 10.1111/mec.15530
- K. Yoda (2018) Advances in bio-logging techniques and their application to study navigation in wild seabirds, *Advanced Robotics*, 33,108-117
- Kimura, S., Akamatsu, T., Dong, L., Wang, K., Wang, D., Shibata, Y. and Arai, N. (2014) Acoustic capture-recapture method for towed acoustic surveys of echolocating porpoises, *J. Acoust. Soc. Am.*, 135, 3364-3370
- Kurogane K (1963) On the tagging experiments for fisheries research in Japan, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 29(5),482-496

- Lasker, R. (1985) An egg production method for estimating spawning biomass of northern anchovy, *Engraulis mordax*. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS, 36, 99 pp
- Lin T, Tsao Y, Akamatsu T, (2018) Comparison of passive acoustic soniferous fish monitoring with supervised and unsupervised approaches. *The Journal of the Acoustical Society of America* 143
- Masuda R, Hatakeyama M, Yokoyama K, Tanaka M (2016) Recovery of Coastal Fauna after the 2011 Tsunami in Japan as Determined by Bimonthly Underwater Visual Censuses Conducted over Five Years. *PLoS ONE* 11(12): e0168261. doi:10.1371/journal.pone.0168261
- Matsushashi, S., H. Doi, A. Fujiwara, S. Watanabe and T. Minamoto (2016) Evaluation of the environmental DNA method for estimating distribution and biomass of submerged aquatic plants. *PLoS ONE*, 11, e0156217
- Miya, M., Y. Sato, T. Fukunaga, T. Sado, J. Y. Poulsen, K. Sato, T. Minamoto, S. Yamamoto, H. Yamanaka, H. Araki, M. Kondoh and W. Iwasaki (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: Detection of more than 230 subtropical marine species. *R. Soc. Open Sci.*, 2, 150088
- Miyashita K, Tetsumura K, Honda S et al., (2004) Diel changes in vertical distribution patterns of zooplankton and walleye Pollock of the Pacific coast of eastern Hokkaido, Japan, estimated by the volume back scattering strength(Sv) difference method. *Fish. Oceanogr*, 13, 99-110
- Oozeki Y, Hu F, Tomatsu C, Kubota H. (2012) Development of a new multiple sampling trawl with autonomous opening/closing net control system for sampling juvenile pelagic fish. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*. 61:100-108
- S. Bograd, B. Block, D. Costa, B. Godley (2010) Biologging technologies: New tools for conservation Introduction, *Endangered Species Research*, 10(1), 1-7
- Shao H, Minami K, Shiragawa H, et al., (2017) Verification of echo sounder measurements of sickness and special distribution of kelp forests, *J. Mar. Sci. and Tech*, 25,343-351
- T. Doi, A. Storto, T. Fukuoka, H. Suganuma, K. Sato (2019) Impacts of temperature measurements from sea turtles on seasonal prediction around the Arafura Sea, *Front. Mar. Sci.*, doi.org/10.3389/fmars.2019.00719
- Takahara, T., T. Minamoto, H. Yamanaka, H. Doi, Z. Kawabata (2012) Estimation of Fish Biomass Using Environmental DNA. *PLoS ONE* 7, e35868
- Ushio, M., H. Murakami, R. Masuda, T. Sado, M. Miya, S. Sakurai, H. Yamanaka, T. Minamoto and M. Kondoh (2017) Quantitative monitoring of multispecies fish environmental DNA using high-throughput sequencing. *bioRxiv* 113472, doi:10.1101/113472
- Y. Yonehara, Y. Goto, K. Yoda, Y. Watanuki et al., (2016) Flight paths of seabirds soaring over the ocean surface enable measurement of fine-scale wind speed and direction. *PNAS* 113(32), 9039-9044
- Yamamoto, S., K. Minami, K. Fukaya, K. Takahashi, et al., (2016) Environmental DNA as a 'snapshot' of fish distribution: A case study of Japanese jack mackerel in Maizuru Bay, Sea of Japan. *PLoS ONE*, 11, e1249786
- Yamamoto, S., R. Masuda, Y. Sato, T. Sado, H. Araki, M. Kondoh, T. Minamoto and M. Miya (2017) Environmental DNA metabarcoding reveals local fish communities in a species-rich coastal sea. *Sci. Rep.*, 6, 40368.
- Zhu, MY., Yamakawa, T., Yoda, M., Yasuda, T., Kurota, H., Ohshimo, S., Fukuwaka, M. Using a multivariate auto-regressive state-space (MARSS) model to evaluate fishery resources abundance in the East China Sea, based on spatial distributional information. *Fish Sci.* 2017; 83: 499-513
- Zhu, MY., T. Yamakawa, T. Sakai : Combined use of trawl fishery and research vessel survey data in a multivariate autoregressive state-space (MARSS) model to improve the accuracy of abundance index estimates. *Fish. Sci.* 2018; DOI: 10.1007/s12562-018-1190-9
- 安部幸樹 (2010) 音響水産資源調査のしくみ：エコー積分法による現存量推定, *日本船舶海洋工学会誌*, 33, 31-36
- 岡村 寛, 市野川桃子 (2016) 水産資源学における統計モデリング, *統計数理*, 64 (1), 39-57
- 河邊 玲 (2009) 遊泳行動の季節変化が漁獲率に与える影響：バイオロギングによるヒラメの事例から, *農林水産技術研究ジャーナル* 32(8), 15-21
- 甘糟和男 (2019) 水産資源の音響調査技術の動向, *日本音響学会誌* 75 (1), 12-16
- 宮下富夫 (2004) 鯨類の目視調査法の現状と課題, *哺乳類科学*, 44 (1), 97-101
- 宮下和士 (2016) バイオロギングによる海洋生物のモニタリング, *沿岸海洋研究*, 53 (2), 169-172
- 宮下和士 (2019) 水産資源と生態系の音響モニタリング手法の開発と応用, *日本水産学会誌*, 85 (3), 294-296
- 虎尾充 (2017) ドローンを用いた空撮映像によるサケマス親魚遡上数の計数, *水産増殖 (Aquacult.Sci.)* 65 (2), 157-159
- 高原輝彦・山中裕樹・源 利文・土居秀幸・内井喜美子 (2016) 環境 DNA分析の手法開発の現状～淡水域の研究事例を中心にして～. *日本生態学会誌*, 66, 583-599
- 市野川桃子, 岡村 寛 (2014) VPAを用いた我が国水産資源評価の統計言語 R による統一的検討, *水産海洋研究*, 78, 104-113
- 水野勝紀 (2019) 海底環境計測における海洋音響技術, *日本音響学会誌*, 75 (1), 23-28
- 大関芳冲 (2010) 小型浮魚類の繁殖生態における時空間的変異特性, *水産海洋研究*, 74, 94-98
- 板谷和彦, 三宅博哉, 和田昭彦, 宮下和士 (2009) 北海道日 本海・オホーツク海沿岸域におけるスケトウダラ仔稚魚の分布, *水産海洋研究*, 73, 80-89