平成 30 年度水産学進歩賞

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

宮 下 和 士

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

Development and application of acoustic methods for monitoring fisheries resources and ecosystems

KAZUSHI MIYASHITA

Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 040-0051, Japan

はじめに

昨今の人間活動の増大により、資源の枯渇が顕在化しつつある。このような背景のなか、国連環境計画が「持続可能な開発目標」を掲げ、環境、資源の持続性を考慮した社会システムの構築、移行を求めている。そして水産分野もその例外ではなく、環境（生態系など）と調和を取りつつ水産資源を持続的に活用して行くことが求められる。

水産資源を持続的に活用するためには、まず、それらが「どのような大きさ」で、「いつ」、「どこに」、「どれくらい」いるのかを知ることが基本となる。しかしながら水産資源は広大な海中を「立体的」に活用したり、「能動的」に移動したりするものも多く、それらを可視化することは簡単ではない。ましてや定量性を担保することは困難を極めるものとなる。

この様な水産資源の定量的可視化を実現するための強力なツールの一つとして、音波を使った計測法、すなわち音響モニタリング手法が国内外で注目され、研究が進められている。本稿では、著者が中心となり世界に先駆けて開発・研究した音響モニタリング手法に関する成果について、その概略を紹介する。

音響周波数特性を利用したサイズ推定、種判別法の開発

対象生物の音響周波数特性を考慮し、種を判別したり、サイズ推定したりすることは、理論的には 1970 年代後半に Greenlaw¹⁾ により提案されていたが、当時の音響機器の未熟さなどから、実際の機器を活用した実証研究が始まったのは 1990 年代後半からである。著者らの研究はその先駆けの一つであり、50 kHz と 200 kHz の計量魚探を活用してカイアシ類を中心とした動物プランクトンのサイズ推定を試みたことや、²⁾ 世界に普及し

ている 38 kHz と 120 kHz の 2 周波を持つ計量魚探を活用し、ツノナシオキアミとスケトウダラを判別・抽出することに成功したこと³⁾などが始まりである。これらは、いわゆる 2 周波差分法と言われるサイズ推定・種判別法であり、現在では最も標準的なサイズ推定・種判別法として国内外で普及している。そしてこれら研究を皮切りに以降、2 周波差分法はカタクチイワシ（主にシラス）、⁴⁾ イカナゴ（コウナゴおよび親魚）⁵⁾などの水産重要魚種、またハダカイワシ⁶⁾などの中深層性魚類への応用も進みつつある。著者らはまた、2 周波以上の多数の周波数を活用した多周波法による動物プランクトンのサイズ判別および密度推定を国内で初めて試みたり、⁷⁾ 単一周波数でのキュウリエソ⁸⁾の種判別法などを開発したりと、様々な条件下における音響によるサイズ推定、判別法を提案し、今日に至っている。

生態研究などへの新たな応用展開

開発したサイズ推定・種判別法などを活用して抽出した各生物は時空間的な定量情報を持ち、例えば被食・捕食の時空間的な関係について可視化することもできる。著者らは本手法を活用することで、道東海域における音響調査情報より、捕食者であるスケトウダラと被食者であるオキアミ類、カイアシ類との時空間的相互作用について定量的に可視化することに成功し、スケトウダラが成魚と幼魚で昼夜における分布が異なることを餌環境との観点から明らかにした。⁹⁾ また、空間統計手法を導入することでツノナシオキアミの空間分布特性が成長段階毎に異なることや、¹⁰⁾ ピンガーで追跡したイワシクジラの採餌行動と計量魚探で判別した餌生物の時空間的分布が一致すること¹¹⁾など、他にも多くの生物の生態研究への応用¹²⁻²⁰⁾を展開し、現在もその応用幅は拡大しつ

つある。

藻場の分布と生態系サービスの定量化

魚群探知機で得られた音響情報は、海底の状態、例えば底質や藻場などの植生情報を含む。特にコンブやアマモ、ガラモなどの藻場は、水産資源として、また沿岸生態系の機能維持のために重要であり、その迅速かつ定量的な分布推定法の確立が望まれていた。そこで著者らは藻場について、音響モニタリングによる分布推定法を開発し、²¹⁻²⁴⁾ その応用法について提案した。例えば知床半島において漁前、漁後にコンブ場の音響調査を実施し、その植生の時空間変化について迅速かつ定量的に可視化することに成功した。²¹⁾ また、津軽海峡沿岸海域においても音響調査を実施し、コンブ場と磯焼けの出現状況の時空間的可視化を実現した。²⁵⁾

アマモ場についてはさらに応用を展開させ、生態系サービスの観点からアマモ場の持つ機能の定量化を進めた。先ず最初の試みとして、著者らは瀬戸内海において藻場の分布を季節毎に可視化し、生態系サービスのうち、特に基盤サービスの季節変動について定量化を実現させた。²⁶⁾ そして能取湖においては、藻場の基盤サービスに加え、供給サービスの定量化も実施し、その経済的価値についても提案した。²⁷⁾

スマート漁業へ向けた普及展開

基礎研究から資源研究、生態研究へと応用の幅を広げると同時に、得られた科学的知見および開発した手法を、持続的漁業のために活用することも試みた。特筆する成果としては、シラス漁業の操業の効率化を目的とした、シラス魚群即日配信システムを開発したことである。²⁸⁾ 本システムは、試験船に搭載した計量魚探により得られた音響情報から、開発した2周波差分法を活用し自動でシラス魚群を抽出し、インターネットを介してリアルタイムにその情報を提供するもので、世界でも先駆的な試みであった。そして現在は、スマート水産業の先駆けとして、本システムを発展させた複数漁船（および魚探）を活用したネットワークシステムが静岡県沿岸において運用されている。今後漁業者自らが漁場を管理するツールとして、これらがより広く普及、活用されることが期待される。

おわりに

著者が水産音響学を始めてから約30年、その技術的發展は目覚ましく、我が国では音響計測技術の高度化、すなわち計測精度向上のための研究を基本とした水産音響学が盛期を迎えており、いまやお家芸として世界に伍する研究体制が整っていると言っても言い過ぎではない。²⁹⁾ 一方で、水産音響学は計測学を基本にした学問で

あると同時に、水産業の発展に貢献するための産業科学、応用科学でもあることを忘れてはならない。そして産業科学、応用科学の観点から、これまでの我が国の水産音響の貢献を考えると、正直、著者らの関連した研究以外には、あまり多くないのが現状である。折しも昨年12月、70年来の大改革と言える改正漁業法が国会で成立した。そしてその中で、国際的にそんな色のない持続可能な資源管理体制の構築、および水産業の成長産業化が謳われた。水産音響学もまた、計測学としての基礎を確固とし、かつ産業科学、応用科学としての側面をより充実させることで、これら両軸に貢献することが出来るものであることは言うまでもない。そして著者を含め関連する研究者が水産音響学の今後の健全な発展を望むのであれば、このことを肝に銘じ研究やプロジェクトを進めるとともに、研究成果の社会実装のための普及活動（読み物³⁰⁻³²⁾の執筆や講演・講習活動など）を積極的に展開して行く覚悟が必要であると強く思う次第である。

謝 辞

ここに紹介した成果は、著者が大学院生時代に所属した東京大学海洋研究所漁業測定部門における研究を皮切りに、大学教員として北海道大学に赴任して自らが立ち上げた研究室（生態系変動解析分野）において実施し得られたものである。そしてこれらの多くの成果は、先生、諸先輩、同期、後輩、そして歴代の学生、ポスドク、サポートスタッフ、内外の多くの関係者とともに創り上げたものであり、著者一人では成し得なかったものばかりである。東京大学名誉教授の青木一郎先生、北海道大学名誉教授（現北海道立工業技術センター長）の三浦汀介先生には、恩師として研究に関する心構え、自らが哲学を持つことの重要性についてご指南頂いた。以上、両先生をはじめお世話になった多くの方々に、この場を借りて深くお礼申し上げる。

文 献

- 1) Greenlaw C. Acoustical estimation of zooplankton populations. *Lim. Oceanogr.* 1979; **24**: 226-242.
- 2) 宮下和土, 青木一郎, 稲垣 正. 2周波を用いた動物プランクトンの音響計測に関する研究. 日本水産学会誌 1996; **62**: 68-72.
- 3) Miyashita K, Aoki I, Seno K, Taki K, Ogishima T. Acoustical identification of isada krill *Euphausia pacifica* Hansen off the Sanriku coast, northeastern Japan. *Fish. Oceanogr.* 1997; **6**: 266-271.
- 4) 宮下和土. シラスの音響周波数特性の昼夜変動に関する考察. 日本水産学会誌 2002; **68**: 564-568.
- 5) Murase K, Ichihara M, Watanabe H, Yonezaki S, Kawahara S, Miyashita K. Acoustical identification of marine organisms in the Kuroshio-Oyashio inter-frontal zone in spring season. *Fish. Oceanogr.* 2009; **18**: 386-401.
- 6) 安間洋樹, 大島達樹, 本田 聡, 宮下和土, 青木一郎. 北海道東部太平洋域におけるトドハダカの音響生物量推

- 定. 日本水産学会誌 2010; **76**: 362–369.
- 7) 宮下和土, 青木一郎, 稲垣 正. 4 周波計量魚探機を用いた動物プランクトンのサイズ別密度推定の試み. 水産海洋研究 1997; **61**: 61–66.
 - 8) 藤野忠敬, 宮下和土, 青木一郎, 増田紳哉, 氏 良介, 志村 健. 計量魚群探知機を用いた日本海隠岐諸島周辺海域におけるキュウリエソの音響散乱層の識別. 日本水産学会誌 2005; **71**: 947–956.
 - 9) Miyashita K, Tetsumura K, Honda S, Oshima T, Kawabe R, Sasaki K. Diel changes in vertical distribution patterns of zooplankton and walleye pollock off the Pacific coast of eastern Hokkaido, Japan, estimated by the volume back scattering strength (Sv) difference method. *Fish. Oceanogr.* 2004; **13**(Suppl. 1): 99–110.
 - 10) 東条斉興, 清水大介, 安間洋樹, 川原重幸, 渡辺 光, 米崎史郎, 村瀬弘人, 宮下和土. 太平洋西部におけるツノナシオキアミ (*Euphausia pacifica*) の分布特性の定量的空間解析. 水産海洋研究 2008; **72**: 165–173.
 - 11) Ishii M, Murase H, Fukuda Y, Sawada K, Sasakura T, Tamura T, Bando T, Matsuoka K, Shinohara A, Nakatsuka S, Katsumata N, Okazaki M, Miyashita K, Mitani Y. Diving behavior of sei whales *Balaenoptera borealis* relative to the vertical distribution of their potential prey. *Mammal Study* 2017; **42**: 191–199.
 - 12) 志田 修, 三宅博也, 金田友紀, 石田良太郎, 宮下和土. 計量魚探による冬季の北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 未成魚の分布特性の解明. 日本水産学会誌 2008; **74**: 152–160.
 - 13) 板谷和彦, 三宅博哉, 和田昭彦, 宮下和土. 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 2009; **73**: 80–89.
 - 14) Kawauchi Y, Shida O, Okumura Y, Tojo N, Yasuma H, Miyashita K. Vertical distribution of walleye pollock juvenile before and after the period of transition for feeding in Funka bay, Hokkaido, Japan. *J. Mar. Sci. and Tech.* 2011; **19**: 279–286.
 - 15) Tojo N, Minami K, Matsukura R, Kawauchi Y, Funamoto T, Chimura M, Nishimura A, Miyashita K. Spatial estimation of euphausiid abundance of Pacific coast off Hokkaido, Japan in early summer of 2008. *J. Mar. Sci. and Tech.* 2011; **19**: 294–301.
 - 16) Kawauchi Y, Chimura M, Mutoh T, Watanobe M, Shirakawa H, Miyashita K. Effect of environmental factors and prey species on daytime and nighttime vertical distribution of juvenile walleye pollock in and around Funka Bay. *Fish. Sci.* 2014; **80**: 139–149.
 - 17) Shida O, Mihara Y, Mutoh T, Miyashita K. Interannual changes in the timing of walleye pollock spawning migration and their impacts on the gillnet fishery in the southwestern Pacific coast of Hokkaido, Donan area, Japan. *Fish. Sci.* 2014; **80**: 173–179.
 - 18) Tsujii K, Otsuki M, Akamatsu T, Matsuo I, Amakasu K, Kitamura M, Kikuchi T, Miyashita K, Mitani Y. The migration of fin whales into the southern Chukchi Sea as monitored with passive acoustics. *ICES J. Mar. Sci.* 2016; **73**: 1085–1092.
 - 19) Saijo D, Mitani Y, Abe T, Sasaki H, Goetsch C, Costa D, Miyashita K. Linking mesopelagic prey abundance and distribution to the foraging behavior of a deep-diving predator, the northern elephant seal. *Deep Sea Res. II* 2016; **140**: 163–170.
 - 20) Iwahara Y, Mitani Y, Miyashita K. Estimation of Environmental Factors that Influence the Migration Timing and Distribution of Pacific White-sided Dolphins around Hokkaido, Japan. *Pacific Sci.* 2017; **71**: 303–318.
 - 21) 南 憲史. 音響手法を用いた藻場の分布推定に関する研究. 博士論文, 北海道大学, 北海道. 2010.
 - 22) 南 憲史, 濱野 明, 東条斉興, 中村武史, 安間洋樹, 宮下和土. 計量魚群探知機を用いた久留見ノ瀬周辺におけるガラモ場の分布推定. 日本水産学会誌 2012; **78**: 171–179.
 - 23) Shao H, Ito Y, Minami M, Yasuma H, Miyashita K. Spatial estimation of the kelp forest (*Laminaria spp.*) distributions in coastal waters of Otsutube Hokkaido, Japan, using acoustic method and geographic information system. *GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences* 2013; **5**: 133–150.
 - 24) Shao H, Minami K, Shirakawa H, Maeda T, Ohmura T, Fujikawa Y, Yotsukura N, Nakaoka M, Miyashita K. Verification of echo sounder measurements of thickness and spacial distribution of kelp forests. *J. Mar. Sci. and Tech.* 2017; **25**: 343–351.
 - 25) Shao H. Study on characteristics and variations of “*Saccharina japonica*” forests distribution around the Tsugaru Strait by acoustic method. Doctoral Thesis, Hokkaido University, Hokkaido. 2016.
 - 26) Sonoki S, Shao H, Morita Y, Minami K, Shoji J, Hori M, Miyashita K. Using Acoustics to Determine Eelgrass Bed Distribution and to Assess the Seasonal Variation of Ecosystem Service. *PLoS ONE* 2016; **11**(3): e015089.
 - 27) 園木詩織. 音響手法を用いたアマモ場の分布および生態系サービスの定量化に関する研究. 博士論文, 北海道大学, 北海道. 2016.
 - 28) 宮下和土. シラス魚群マップ即日配信システムの紹介. 日本水産学会誌 2011; **77**: 300–303.
 - 29) 宮下和土, 甘糟和男. 水産音響技術とその応用展開. 3. 漁具・漁法の研究, 日本水産学会誌 2018; **84**(特別号): 44–47.
 - 30) 宮下和土. 海洋生物資源を可視化する. 「フィールド科学への招待」(北方生物圏フィールド科学センター編), 三共出版, 東京. 2006; 129–139.
 - 31) 宮下和土. 音響計測などの多次元計測とその応用による水産業のスマート化. 「スマート農業」(農業情報学会編), 農林統計出版, 東京. 2014; 202–206.
 - 32) Miyashita K. Acoustic survey, In: Aoki I, Yamakawa T, Takasuka A (eds). *Fish Population Dynamics, Monitoring, and Management*, Springer Japan, Tokyo. 2018; 139–157.