



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	音響手法を用いたアマモ場による生態系サービスの定量的評価に関する研究 [全文の要約]
Author(s)	伊藤, 慶造
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16184号
Issue Date	2024-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94087
Type	doctoral thesis
File Information	ITOH_Keizo_summary.pdf



学 位 論 文 内 容 の 要 約

博士（環境科学）

氏 名 伊藤 慶造

学 位 論 文 題 名

音響手法を用いたアマモ場による生態系サービスの定量的評価に関する研究
(Study on quantitative assessment of ecosystem services by eelgrass beds using acoustic method)

生態系サービスは、人間が生態系から受ける恩恵と定義されている。生態系サービスは、その役割によって供給サービス、調整サービス、文化的サービス、基盤サービスの4つに分類される。生態系サービスの価値は、貨幣単位で示されることが多い。生態系サービスの価値を貨幣単位で表すことは、一般の人々や政策立案者に対して、生態系や生物多様性の重要性を認識しやすくさせる。そのため、生態系サービスを貨幣価値で示して評価することは、今後の持続可能な社会の形成に大きく貢献できるため重要である。

アマモ場は、アマモ属 *Zostera* spp. 植物を中心に形成された海草藻場の1つであり、世界中の温帯沿岸域に広く分布している。アマモ場は、漁業生産の向上や二酸化炭素 (CO₂) の吸収、水質浄化など多様な機能を持っており、多くの生態系サービスを提供している。アマモ場による生態系サービスの価値を明らかにすることは、アマモ場の保全と管理のための基盤となるため重要である。しかし、これまでのアマモ場による生態系サービスの研究は、点データや面データでの評価がほとんどであり、沿岸域全体の3次元的な空間データを用いた生態系サービスの評価例はほとんどない。また、アマモ場を含む海草藻場の分布は近年世界的に減少しており、保全のために要因を示すことが求められている。そのためには、基礎情報となるアマモ場の分布及びアマモ場を構成するアマモ類の生物量の可視化が重要である。

音響手法は、藻場の3次元的な分布を推定する手法として有効である。音響データから藻場の厚みを抽出して、水平的かつ鉛直的に示した研究が多く報告されている。一方で、音響手法を用いて

藻場の生物量を推定した研究はほとんどなく、基礎情報となる生物量を沿岸域全体で示すことができれば、より詳細な生態系サービスの定量的評価が可能になる。そこで本研究では、音響手法を用いてアマモ場の分布及び生物量を推定して、アマモ場による生態系サービスを定量的に評価することを目的とした。

2章では、音響手法を用いた水中生物の生物量の推定法について、音響指標となるターゲットストレングスTSを把握して、対象海域で単位体積当たりの後方散乱強度SV、単位面積当たりの後方散乱強度SAを求める必要があると記述した。

3章では、屋内実験でアマモ *Zostera marina* のTSを調べた。アマモは、北半球で最も広く見られる海草の1種で、アマモによって構成されるアマモ場は、多様な生態系サービスを提供している。アマモは栄養株と生殖株があり、多年生のアマモから構成されるアマモ場において、株のほとんどが栄養株である。アマモの生物量を音響手法で明らかにするためには、まずアマモの栄養株の音響特性を把握する必要がある。アマモの栄養株は、葉の内部にlacunaeという空洞の器官をもち、この内部にガスを有している。ガスは水中で音を強く反射することから、魚類では鰾の音響反射への寄与率は90-95%とされている。そのため、lacunaeを有するアマモの栄養株は、TSの計測が可能であると推察される。海草・海藻類のTSに関する研究はわずかで、アマモのTSを計測した研究はこれまでにない。そこで、本章では屋内の実験水槽を用いて、アマモのTSを明らかにすることを目的とした。

2023年9月12日に北海道網走市の能取湖でアマモの栄養株を採取して、函館市の函館市国際水産・海洋総合研究センターに輸送した。音響計測は、9月20, 22-25, 27日に同センターの屋内実験水槽(縦×横×高さ: 5×10×6 m) で、計量魚群探知機 KSE-300 (120 kHz, 株式会社ソニック) を用いて行った。距離分解能を考慮して、約30 cmの草体を1本もしくは複数本束ねて、水槽内に懸垂してTSを計測した。計測後に、サンプルの湿重量と乾燥重量を計測して、関係を得た。TSは重量に依存することから、アマモのTSと常用対数をとった乾燥重量との関係式 (TS-重量式) を得た。

計測は44回行い、アマモの湿重量と乾燥重量には極めて強い正の相関がみられた ($r^2=0.98, p<0.01$)。アマモのTSと常用対数をとった乾燥重量には正の相関がみられ、TS-重量式を得ることがで

きた ($r^2=0.59, p<0.01$). 海草・海藻類のTSに関するこれまでの研究は、本研究と同じ周波数120 kHzを用いて、アカモク *Sargassum horneri* とマコンブ *Saccharina japonica*, クロメ *Ecklonia kurome* で行われている。仮に乾燥重量が10000 mgのアマモ、アカモク、マコンブ、クロメが得られた場合、アマモのTSは、アカモクのTSより弱く、マコンブとクロメのTSより強く、これは草体・藻体内に含まれるガスによって異なっていると示唆された。このことから、本章でのアマモのTS-重量式は適切であり、生物量の推定のためのパラメータとして適用できるものと考えられる。

4章では、音響手法を用いてアマモ場の分布及びアマモ場を構成するアマモ類の生物量を推定した。アマモ場は、沿岸生態系にとって重要な生物群落であり、アマモ場による生態系サービスを定量的に評価するためには、沿岸域全体のアマモ場の分布や生物量の推定が必要である。また、海草藻場の分布は世界的に減少傾向にあり、要因を明らかにするためにも、基礎情報となるアマモ場の分布及び生物量を推定すること、モニタリングすることが求められている。北海道網走市の能取湖は、冬季に湖面が結氷する閉鎖性の海跡湖であり、広大なアマモ場が形成されている。能取湖でのアマモ場は、ホッカイエビ *Pandalus latirostris* などの漁業資源に生息地を提供することから、地元にとって重要な生物群落であり、アマモ場の分布及び生物量を推定することが重要である。音響手法では、これまでにアマモ場の分布を示す研究は行われているが、生物量の推定は行われていない。そこで本章では、音響手法を用いたアマモ場の分布及び生物量の推定を目的とした。

調査は、アマモ場の繁茂期である2013年6月24-25日と2023年7月3-4日、10日に実施した。計量魚群探知機は、2013年がKCE-300で、2023年がKSE-300 (いずれも120 kHz, 株式会社ソニック) を使用した。取得した音響データから、アマモ場の上端と下端 (海底) のラインを設定して、上端から下端までの距離をアマモ場の厚みと定義した。空間統計学的手法の1つである確率クリギングを用いて、アマモ場の有無の情報からアマモ場の分布を推定した。通常クリギングを用いて、アマモの厚み分布図を作成して、アマモ場の分布面積を得た。次に、音響計測の探知不能範囲を考慮して、先述のアマモ場の下端より45 cm浅いラインを新たに設定した。アマモ場の上端から新しく設定した下端のラインまでのアマモ場のSVを抽出した。このSVに本来のアマモ場の厚みを乗じて、アマモ場のSAを算出し、これを SA_{Total} と定義した。 SA_{Total} を3章から求めたTSで除して、アマモ場の単位面

積当たりの生物量を得た。通常クリギングを用いて、アマモ場の生物量分布図を作成して、能取湖全体の生物量を推定した。2013年と2023年で、アマモ場の厚み、アマモが分布していた水深、分布面積、生物量を比較した。

2023年のアマモ場は、2013年のアマモ場より厚く、分布していた水深が深かった。また、2023年のアマモ場の分布面積及び生物量は、2013年より大きく推定された。2023年では能取湖の北側やオホーツク海に開口する湖口付近でアマモ場が確認されたことが、2013年より分布面積が大きく推定されたと考えられる。能取湖は冬季に湖面が結氷することが知られているが、近年の気候変動で能取湖の近くにあるサロマ湖では結氷期間が短くなっている。結氷期間が短くなり、その結果アマモ類の生育制限要因の1つである光量が増加したことにより、能取湖のアマモ場の分布に影響を与えたものと考えられ、結氷する環境下のアマモ場の特徴として、今後環境も含めてモニタリングを行うことが必要と考えられる。また、本章では音響手法を用いて能取湖全体のアマモ場の生物量を推定することができた。本手法は、これまでの厚みの情報に加えて、単位面積当たりの生物量を考慮した新たな藻場のモニタリング手法であり、生物量の情報を基にして、沿岸域全体のアマモ場による生態系サービスの評価への展開が期待される。

5章では、分布及び生物量推定に基づくアマモ場による生態系サービスを定量的に評価した。アマモ場がもつ機能の1つに、生物への生息地提供があり、漁業生産の向上に貢献することが知られている。ホッケイエビは、能取湖の主要な漁業資源の1種であり、本種の生活史はアマモ場に強く依存している。本種の単位努力量当たりの漁獲量 (CPUE) は、アマモ場の空間的な分布や水深に影響することから、期待されるホッケイエビの漁獲量をアマモ場による供給サービスとして試算した研究が報告されている。一方で、アマモ場の分布は時空間的に変動することから、供給サービスも時空間的に変動することが推察され、供給サービスのモニタリングが重要である。次に、アマモ場がもつ機能として、CO₂吸収が挙げられる。近年、藻場によって吸収された炭素をブルーカーボンと呼び、気候変動を緩和に貢献している。日本では藻場によって吸収されたCO₂を権利化して、販売する事業 (Jブルークレジット[®]) があり、CO₂吸収量の正確な試算が求められている。さらに、アマモ場がもつ機能の1つに、水質浄化があり、窒素除去によって水質を浄化し、豊かな沿岸生態系

を築くために重要な役割を担っている。CO₂吸収や窒素除去は調整サービスにあたり、これらは、沿岸域全体で3次元情報を用いて試算した例はほとんどない。調整サービスは、気候や水質の安定に寄与するため、空間的な価値の見える化が重要である。そこで、本章ではアマモ場の分布及び生物量を基に、ホッカイエビの漁業生産、CO₂吸収、水質浄化に関する生態系サービスの定量的評価を目的とした。

ホッカイエビの漁業生産では、先行研究のホッカイエビのCPUEと、アマモ場の空間的な分布や水深との関係を示した一般化加法モデルのベストモデルを用いて、4章の2013年と2023年の能取湖のアマモ場の分布から、期待される本種のCPUEを予測した。通常クリギングを用いて、期待される本種の漁獲マップを作成した。期待される本種のCPUEに操業情報、本種の平均単価を乗じて、能取湖での期待されるホッカイエビの漁獲量と漁獲金額を試算した。

CO₂吸収では、ジャパンブルーエコノミー技術研究組合より令和6年3月に発行された「Jブルークレジット[®]認証申請の手引き—ブルーカーボンを活用した気候変動対策—」のVer.2.4に記載されているCO₂吸収量の算定方法をもとに定量化した。CO₂吸収量の算定方法は、藻場の分布面積から算出する方法と生物量から算出する方法の2パターンがあり、分布面積から算出する方法を面積ベース、生物量から算出する方法を生物量ベースとして、4章で推定した能取湖のアマモ場の分布面積及び生物量から、2013年と2023年の面積ベースと生物量ベースのCO₂吸収量をそれぞれ算出した。CO₂吸収量に、Jブルークレジット[®]での平均単価を乗じて、CO₂吸収金額を算出した。

水質浄化では、既往のアマモによる窒素除去量の算出式を用いて、4章で推定した能取湖の生物量から2013年と2023年の窒素除去量をそれぞれ算出した。窒素除去量に、下水処理による窒素1 kgの除去にかかる年間経費を乗じて、窒素除去金額を算出し、アマモ場による水質浄化機能として評価した。

ホッカイエビの漁業生産では、2013年の方が2023年よりわずかに期待されるホッカイエビの漁獲量と漁獲金額が高かったが、本種のCPUEの年変動が大きいことから、2013年と2023年ではほとんど変動はなかったものと考えられる。一方で、4章よりアマモ場の分布面積は、2013年より2023年の方が大きいことから、アマモ場の空間的特徴以外の要因による影響が示唆される。しかし、ホッ

カイエビはアマモ場に依存し、本種の資源量推定の最大の環境要因はアマモ場の分布面積である。また、本種は成長段階でアマモ場の空間的構造の利用様式を変化していることから、アマモ場の空間的な可視化から生態系サービスを評価できたことの意義は高く、今後の本種の資源管理に貢献できると期待される。

CO₂吸収量と吸収金額は、面積ベースの方が生物量ベースより高く見積もられた。面積ベースによる算出法では、過去の文献値からアマモ場の最大の生物量などを基にした係数が定められており、この係数と分布面積を基にCO₂吸収量を算出するため、過大評価になっている可能性が考えられる。このことから、本研究の音響手法による生物量推定から生物量ベースで求めたCO₂吸収量は、これまでより算出精度の向上に大きく貢献するものと考えられる。また、CO₂吸収量、窒素除去量ともに、2013年より2023年の方が高く見積もられた。これら調整サービスは、海草藻場の大きさに依存することが知られており、これまでの2次元的な分布面積ではなく、3次元的な生物量を用いて空間全体の生態系サービスの価値を試算できたことは、藻場の正しい価値の認知につながり、気候変動対策ほか、様々な意思決定に貢献できると考えられる。本章より、音響手法から推定したアマモ場の分布及び生物量を基に、能取湖全域のアマモ場による生態系サービスを定量的に評価できた。

6章では、これまでの藻場による生態系サービスの課題と、その課題解決に向けた本研究の取り組み、その結果得られた知見を基に、藻場のモニタリングや、生態系サービスの評価、藻場の利用や管理について総合考察を行った。これまでの藻場による生態系サービスの評価の課題の1つに、点データや面データによる評価が多く、沿岸域全体の3次元的な空間データを用いた評価ができなかったことが挙げられる。また、その基礎情報となる詳細な藻場の分布や生物量の情報が不足しており、詳細な生態系サービスの評価ができなかったことも課題であった。そこで、本研究では能取湖全域の2年分の音響データを用いて、アマモ場の分布及びアマモ場を形成するアマモ類の生物量を推定して、アマモ場による生態系サービスを定量的に評価した。これは、アマモ場の適切な利用や管理のための基盤情報となり、持続可能な地域社会の発展に貢献することが期待される。

水産庁の広域藻場モニタリングの手引きでは、藻場の様々な調査手法が整理されており、音響手

法は藻場の有無と厚みの情報が得られると記載されている。本研究から、音響手法では対象種のTSを計測することで、分布に加えて生物量まで推定可能となり、新しいモニタリング手法を確立することができた。今後、TSのデータベースの構築や藻場の季節変化を考慮した音響調査を実施することで、日本の沿岸域に生息するあらゆる藻場の評価への展開が期待される。

また、本研究ではアマモ場の分布及び生物量を基に、生態系サービスを評価した。沿岸域全体でアマモ場による生態系サービスを時空間的に評価した例はこれまでになく、新しい評価手法である。今後、アマモ場に関する基礎情報を基に、様々な生態系サービスの価値を積み上げていくことが可能になり、アマモ場に係るステークホルダーによる最適なアマモ場の利用法、保全管理活動の推進への展開が期待される。本研究で示したアマモ場による生態系サービスの評価は、将来的な藻場及び沿岸生態系の適切な管理につながると期待される。