

学位論文題名

Predicting Potential Habitat Hot Spots and Migration Pattern for Albacore Tuna, *Thunnus alalunga*, in the Northwestern North Pacific using Satellite Remote Sensing and GIS

(衛星リモートセンシングと地理情報システム (GIS) による
北西北太平洋におけるビンナガマグロ *Thunnus alalunga* の
潜在生息域ホットスポットと回遊パターンの予測に関する研究)

学位論文内容の要旨

【序 論】

ビンナガマグロ *Thunnus alalunga* は北太平洋において日本の延縄漁業の対象魚であり、商業的にも生態学的にも重要な漁業資源である。経済的な観点からは、この種は高経済価値があり、広い市場性もある。本種は、北太平洋の北緯 10 度から北緯 50 度までの熱帯域から亜寒帯域に出現し、日本周辺海域から米国西海岸まで広く回遊する。1950 年から 2000 年にかけて漁獲量は増加したにもかかわらず、漁獲量は安定して推移している。北太平洋では、ビンナガマグロの総漁獲量は年平均 200,000 トン以下である。このことは、本種の潜在的な漁場がいまだ完全に理解されておらず、その結果、本資源は開発途上といえる。特に北西北太平洋において、ビンナガマグロの高生産漁場（生息域ホットスポット）を制御している海洋環境条件を明らかにすることが非常に重要である。

ビンナガマグロの回遊、出現、分布量は、海洋前線や渦のような海洋構造に強く影響されていることも報告されている。ビンナガマグロ漁場を形成する要因として、海洋物理構造は、黒潮－親潮移行域付近の海洋ホットスポット形成に関する重要なメカニズムに関係している。生息域ホットスポットは、海表面水温 (SST)、海面クロロフィル a 濃度 (SSC)、海面高度アノマリー (SSHA) のような環境変数を代表値として定義できる可能性がある。近年、漁獲データと衛星リモートセンシングデータと組み合わせて、地理情報システム (GIS) 技術を駆使することが、海盆地スケールでの、生息域ホットスポットに関連した環境条件の動態理解のための強力なツールであると認識されるようになってきた。海洋好生息域は、研究水域に

におけるビンナガマグロの回遊パターンとも関連しているものと考えられる。

本研究の目的は以下の通りである。(1) ビンナガマグロ漁場分布と海洋環境(海表面温度(SST)、クロロフィル a 濃度(SSC)、海面高度アノマリー(SSHA))との関係を明らかにする。(2) ビンナガマグロの潜在的生息域ホットスポットを明らかにする。(3) (2)をもとに高生産生息域ホットスポットを予測する。(4) 衛星リモートセンシングと GIS を用いてビンナガマグロの回遊パターンを理解する。

【使用データ】

本研究では漁獲データと衛星データの2つのデータを用いた。

漁獲データ

1998年～2003年の6年間のビンナガマグロ延縄漁獲データを用いた。漁獲データは漁業情報サービスセンターから入手した。漁獲データは日単位の漁獲位置、CPUEを含み、衛星データの時空間スケールにあわせて、これらを8日間平均、月平均で0.088度(約9km×9km)のグリッドデータに再編集して解析に用いた。

衛星データ

衛星データとして、SST、SSC、SSHAの3種類を用いた。海表面温度データは、日単位と月平均のTRMM/TMI SST data version 3aと8日間平均および月平均のNOAA/AVHRR SST data pathfinder version 5を用いた。空間解像度はTMIが25 km、AVHRRが4 kmであるが、これをすべて9 kmに再構築した。TMIは日単位データから、8日間平均データを作成した。海面クロロフィル a 濃度データは、8日間平均および月平均のNASA. Global Area Coverage (GAC)のSeaWiFS level 3 standard mapped images (SMI)を用いた。海面高度アノマリーデータは、メルカトル図法の空間解像度1/3度、時間解像度1週間のthe Maps of Sea Level Anomalies (MSLA/AVISO)を用いた。海面高度アノマリーデータを用いて、渦運動エネルギー分布および地衡流分布を計算し、渦分布や黒潮続流分布の解析に用いた。SeaWiFS level 3 standard mapped images (SMI)のPAR(日射量)データおよびAVHRR海表面水温データと海面クロロフィル a 濃度データと組み合わせて、基礎生産量も算出した。

【解析方法】

ビンナガマグロ分布と海洋環境との関係

CPUEデータを用いて、(1) CPUE(1日当たり1漁船あたりの漁獲尾数)がゼロの場合、(2) CPUEが0～17の場合、(3) CPUEが17以上の場合

にわけ、(3) を高漁獲期 (High catches) とした。特に、経験的積算分布関数 (Empirical Cumulative Distribution Function : ECDF) を計算して、この高漁獲期における、ビンナガマグロの好適な SST、SSC、SSHA を算出した。

生息域ホットスポットの抽出

1998 年～2003 年の 11 月から 3 月までの高漁獲期における、海洋環境要素 (SST、SSC、SSHA) のヒストグラム分布と ECDF 解析の結果を用いて、平均値と標準偏差値による単純な漁場推定マップを作成した。さらに、好適環境要素のうち SST と SSC の平均値を用いて、等値線解析をおこなった。

生息域ホットスポットの検証

抽出できた好適環境要素 (SST、SSC) を用いて潜在的な生息域ホットスポットマップを作成して、ビンナガマグロ CPUE 分布データと照合した。その結果から、空間解析ソフトウェアを利用して確率インデックスマップを作成した。さらに、渦運動エネルギー分布および地衡流分布、基礎生産量分布と生息域ホットスポットとの空間的対応関係について解析した。

生息域ホットスポットの推定

ビンナガマグロの出現と分布量を推定するための手法として、空間統計学手法の一般化加法モデル (Generalized Additive Model : GAM) と一般化線形モデル (Generalized Linear Model : GLM) を用いた。海洋環境要素 (SST、SSC、SSHA) と CPUE を入力データとして、binominal モデルによりビンナガマグロの出現推定、gaussian モデルによりビンナガマグロの分布量推定をおこなった。

Kinesis モデルによる回遊シミュレーション

日単位の TMI SST データを利用して、海面水温情報を好適環境として回遊を制御していると仮定した Kinesis モデルを作成して、回遊の数値実験を試みた。ビンナガマグロにとっての好適海面水温は $20^{\circ}\text{C} \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ 、遊泳速度は 6.6 km h^{-1} とした。

【結果と考察】

好適海洋環境と生息域ホットスポットの抽出

ビンナガマグロの好適海洋環境は、SST が $18.5\text{--}21.5^{\circ}\text{C}$ 、SSC が $0.2\text{--}0.4 \text{ mg m}^{-3}$ 、SSHA が $-5\text{--}40 \text{ cm}$ の範囲であることが明らかになった。最も頻度の高い SST は 20°C 、SSC は 0.3 mg m^{-3} 、SSHA は 18 cm であった。これらは ECDF 解析の結果において統計的に有意であった。

得られた好適海洋環境条件を用いて、潜在的な生息域ホットスポットマップを作成し、実際の漁場分布と比較した。その結果、シャツキー海嶺周辺の黒潮続流の北側で良い一致がみられた。さらに、高 CPUE の漁場は、SST

が 20°C の等温線と、SSC が 0.3 mg m^{-3} の等濃度線との緯度方向の距離が、CPUE に逆相関していることが明らかになった。その関係は、 $CPUE = 39.39 - 3.9078 \times (\text{距離})$ ($R = -0.76, P < 0.0001$) で表すことができる。このことは、好適海洋環境要素が隣接する海域では、ビンナガマグロがより高密度で分布することを示唆している。

生息域ホットスポットの検証

好適海洋環境に基づいた潜在的な生息域ホットスポットマップとビンナガマグロ CPUE 分布との比較より、全 CPUE 値と漁場分布確率指数との関係は、確率指数 55% で変曲点をもって線形回帰していることが明らかになった。これをもとに、潜在的な生息域ホットスポットマップを、Poor (0-55%)、Fair (55-75%)、Good (75-90%)、Excellent (90%以上) に区分して作成した。漁場推定上で最も重要な Excellent 域は、例えば 1998 年 11 月は 36-37°N、167-170°E の狭い海域に分布し、研究水域のわずか 1.1% しか占めていなかった。これらの高密度海域は、正の SSHA で、相対的に渦運動エネルギーの高いシャツキー海嶺周辺海域や黒潮続流の北側海域と一致していた。

生息域ホットスポットの推定

一般化加法モデルと一般化線形モデルを利用することにより、潜在的な生息域ホットスポットマップを確率パーセントで表現できた。さらに CPUE 推定マップも CPUE 値で表現できた。1998~2000 年は、2002、2003 年と比較して、高確率域が多く現れたのは、渦・フロント分布が多く、下層から栄養塩供給が多く、1次生産から2次生産へと影響し、餌料環境が良かったことに起因すると考えられた。

回遊パターンの推定

シミュレーションの結果と、延縄漁業データによる高密度域分布の南下パターンとは、特に 11 月、12 月について良い一致を示した。回遊モデルから得られたビンナガマグロの高密度分布域の SST 分布は、これまでの衛星リモートセンシングデータ解析の結果と良く一致した。特に、南下回遊については、ビンナガマグロの餌生物（イカ類など）の回遊パターンと一致しており、モデルの有効性が示唆された。

【おわりに】

本研究は、衛星リモートセンシングと GIS 技術を応用して、どのようにビンナガマグロが海洋環境に応答しているか理解し、その漁場推定モデルの開発に挑戦したものである。本研究を発展させることにより、“オペレーショナル”水産海洋学をさらに一歩進めて、このモデルを実際の漁業へ応用して、効率的で持続可能な漁業の推進に貢献できることを期待している。

学位論文審査の要旨

| | | |
|----|-----|-------|
| 主査 | 教授 | 齊藤誠一 |
| 副査 | 教授 | 三浦汀介 |
| 副査 | 教授 | 飯田浩二 |
| 副査 | 教授 | 桜井泰憲 |
| 副査 | 助教授 | 米田國三郎 |
| 副査 | 助教授 | 清水晋 |

学位論文題名

Predicting Potential Habitat Hot Spots and Migration Pattern for Albacore Tuna, *Thunnus alalunga*, in the Northwestern North Pacific using Satellite Remote Sensing and GIS

(衛星リモートセンシングと地理情報システム(GIS)による
北西北太平洋におけるビンナガマグロ *Thunnus alalunga* の
潜在生息域ホットスポットと回遊パターンの予測に関する研究)

近年、国連海洋法により、排他的経済水域 (EEZ) 内での十分な資源の開発利用と、もし資源が必要以上にある場合に、それを他国に利用させることを義務付けられている。このような状況の中から、わが国周辺水域の環境収容力を明らかにすることを目的に従来の資源量推定法に加え、広い海域の資源量や生産環境を、短時間かつ高精度に探査できる新しい資源量推定法やリアルタイム海洋生物資源環境モニタリングシステムの開発が急務である。そして、持続的に海洋生物資源を利用する視点や資源回復計画案の策定上からも、いつ、どこに、どのくらいの資源が利用可能かリアルタイムで知る必要がある。

本研究で対象としたビンナガマグロ *Thunnus alalunga* は、北太平洋において日本の延縄漁業の対象魚であり、商業的にも生態学的にも重要な漁業資源である。経済的な観点からは、この種は高経済価値があり、広い市場性もある。本種は、北太平洋の北緯 10 度から北緯 50 度までの熱帯域から亜寒帯域に出現し、日本周辺海域から米国西海岸まで広く回遊する。1950 年から 2000 年にかけて漁獲量は増加したにもかかわらず、漁獲量は安定して推移している。北太平洋では、ビンナガマグロの総漁獲量は年平均 200,000 トン以下である。このことは、本種の潜在的な漁場がいまだ完全に理解されておらず、その結果、本資源は開発途上といえる。特に北西北太平洋において、ビンナガマグロの高生産漁場 (生息域ホットスポット) を制御している海洋環境条件を明らかにすることが非常に重要である。

これまでのビンナガマグロ資源と生態に関する調査研究では、調査船による漁獲・観測データや標識放流・再捕などにより、その分布・豊度や回遊経路が調べられている。しかし、年間を通した生息海域全体での分布・移動、あるいは海洋環境と統合した漁場形成に関する知見は断片的である。

そこで本研究では、主に人工衛星により観測された海面水温、クロロフィル a 濃度、海面高度データおよび6年間の漁獲データを用いて、衛星情報が漁場形成の指標として使用できるかを検証し、ビンナガマグロの回遊と漁場形成に関わる海洋環境との関係を明らかにしようとしたものである。さらに、漁場予測モデルの開発および回遊シミュレーションをおこなった。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. ビンナガマグロの好適海洋環境は、海表面温度が $18.5\sim 21.5^{\circ}\text{C}$ 、クロロフィル濃度が $0.2\sim 0.4\text{ mg m}^{-3}$ 、海面高度偏差が $-5\sim 40\text{ cm}$ の範囲であることが明らかにした。
2. 好適海洋環境に基づいた潜在的生息域ホットスポットマップとビンナガマグロ CPUE 分布との比較より、全 CPUE 値と漁場分布確率指数との関係を明らかにした。
3. 一般化加法モデルと一般化線形モデルを利用することにより、潜在的生息域ホットスポットマップを確率パーセントで表現できる潜在漁場予測モデルを開発した。
4. 回遊シミュレーションモデルに、環境情報として日単位の衛星観測海表面温度を適用して、高密度域分布の南下パターンの予測可能性を示した。

本研究は、衛星リモートセンシングと GIS 技術を応用して、どのようにビンナガマグロが海洋環境に応答しているか理解し、その漁場推定モデルの開発に挑戦したものである。本研究を発展させることにより、“オペレーショナル”水産海洋学をさらに一歩進めて、このモデルを実際の漁業へ応用して、効率的で持続可能な漁業の推進に貢献できることを期待している。

審査員一同は、本研究が、ビンナガマグロの回遊と漁場形成機構に関する統合的な知見を得たものと高く評価し、本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。