HEPを応用して構築した予測モデル によるマダイの漁場環境評価

市瀬 友啓¹・中桐 栄²・島田 広昭³・古林 将⁴

¹正会員 兵庫県県土整備部土木局港湾課 (〒650-8567 兵庫県神戸市中央区下山手通5-10-1)

E-mail: tomohiro_ichise@pref.hyogo.lg.jp

²農修 兵庫県農政環境部農林水産局水産課 (同上)

E-mail: sakae_nakagiri@pref.hyogo.lg.jp

³正会員 博(工) 関西大学環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: shimada@kansai-u.ac.jp

⁴学生会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 (同上)

E-mail: k407446@kansai-u.ac.jp

水産資源の維持・増大と漁業経営の安定化に資するため、各地で漁場整備事業が実施されているが、こうした事業の定量的な効果算定を行うためには、継続的なモニタリング調査等が必要となり、費用面からも定性的な評価にとどまることが多いのが現状である。本研究では、HEPを応用して構築した予測モデルをマダイの漁場環境評価に適用しようとして以下の結論を得た。餌料環境のポテンシャルが向上し、マダイの生息環境は改善したことから、マダイの漁獲量は増加した可能性が示唆された。マダイの全漁獲量のうち約2割については、漁場造成に伴う餌料の増加が寄与する可能性が示唆された。本研究により得られたHEPを応用して構築した予測モデルは、評価海域の漁獲量の傾向だけでなく、マダイの餌料環境に着目した漁場環境評価に活用できることが示唆された。

Key Words : Intertidal zone, sessile organism, fishing ground environment, Red seabream, HEP

1. 研究の目的

水産資源の維持・増大を図り漁業経営の安定化に資するため、各地で漁場造成をはじめとした自然再生事業が実施されている。しかしながら、こうした事業の定量的な効果算定を行うためには、事業着手前の生物環境調査や事業完了後の継続的なモニタリング調査等が必要となることから、費用面からも定性的な評価にとどまることが多いのが現状である。

そこで本研究では、生物生息環境や漁場環境を簡便かつ定量的に評価ができるハビタット評価手続き¹⁾(Habitat Evaluation Procedure 以下、「HEP」)を用い、「潮間帯における付着生物と水質を指標とした漁場環境評価手法に関する研究²⁾(以下、「著者らの研究」)」において構築した予測モデルを、継続して実施した現地調査結果等の知見を加えて改良を行った上で、マダイの漁場環境評価に適用しようとした。

2. 研究の内容

(1) 調査地点の設定と調査の概要

調査地点の選定は、調査結果を漁場環境の評価に適用することを前提として既存の水質調査結果の有無、既存の付着生物調査結果の有無、統計資料の有無、地域の漁業実態、現地調査の作業工程等を勘案し、図-1に示した大阪湾、播磨灘および紀伊水道に面した6地点の容易にアクセスできる人工海浜に設置された石積突堤や人工磯等の周辺を調査地点として設定した。

調査は、2009年10月から2011年10月にかけて合計10回実施し、付着生物の確認種数調査と水質(水温、塩分、pH、DO、COD)、および気象(気温・風向・風速等)の観測を行った。

なお、湊(南あわじ市)の調査地点については、第2回調査より追加し、2009年12月から2011年10月にかけて合計9回実施した。

図-1 調査地点位置図

(2) 予測モデルの構築

a) HEPによる比較対象と評価対象

本研究では、現地調査を実施した大阪湾、播磨灘および紀伊水道に面する6調査地点をHEPによる比較対象として設定した。

また、評価の対象は、調査地点で確認された付着生物とし、特定の付着生物を対象とするのではなく、調査地点で確認された付着生物の種数を評価対象とした。

b) 適正指標(SI)モデルの構築

HEPによる予測モデルの構築は、現地調査結果やその他の既存文献を勘案しつつ、基本的に橋中ら³⁾の方法に従い、図-2に示したとおり塩分(単位: PSU), pH, DO(単位: mg/L), COD(単位: mg/L)の4項目の適正指標(Suitability Index 以下、「 $SI_{(x)}$ 」)モデルの構築を以下の方法により行った。

まず、付着生物の確認種調査における付着生物の確認種数と水質の調査結果との関係を散布図にプロットし、付着生物の確認種数の最大値を n とし、 SI の最大値は n を $SI=1.0$ と設定した。また、付着生物の確認種数の最小値を m とし、 SI の最小値は $SI=x$, $x=m/n$ と設定した。今回の調査結果については、付着生物の確認種数の最大値 n は阿万(南あわじ市)における $n=44$ であったことからこれを基準点として $SI=1.0$ とした。なお、 DO が0の環境、すなわち無酸素の環境では生物は生息できないと考えて、 $m=0$ と設定し SI の最小値を $SI=0$ と設定した。

次に、4項目の水質指標に関する観測値の範囲内で、それらの点の大部分を包絡するような直線を算出した。また、直線の変化点については、基本的にプロットされた点を包絡するように変化点を設定し、 SI_p , SI_D , SI_C については、水産用水基準⁴⁾における海域の基準値を踏まえつつ設定した。

図-2 構築したSIモデル

c) ハビタット適正指標(HSI)モデルの構築

ハビタット適正指数 (Habitat Suitability Index 以下、「 HSI 」) モデルの構築についても、橋中ら³⁾の方法に従い、 SI のうち最小のものが付着生物の生息環境に大きく影響を与え、そこに生息できる種数を制限するとして、

限定要因法により4項目のSIモデルを統合して式(1)に示したHSIモデルを構築した。

$$HSI = \min(SI_s, SI_p, SI_D, SI_C) \quad (1)$$

d) 構築したHSIモデルの検証

構築したHSIモデルの妥当性を確認するため、図-3中には、6調査地点におけるHSI値と付着生物の確認種数最大値との関係を●印で、HSIと最大値を除く付着生物の確認種数の関係を▲印で示した。

なお、この図には理想的な算出結果を表すものとして、原点とHSI値および付着生物の確認種数が最大の点{(HSI,n)=(1,44)}を通る直線を記入した。HSI値の算出結果の妥当性は、プロットした点がこの直線よりも右下部にあり、かつ、この直線の付近にあることを基準に判断する。

6調査地点におけるHSI値と付着生物の確認種数最大値との関係について、図-3中に線形を示したとおり、その相関係数は $R^2=0.87$ となり概ね調査地点周辺の潮間帯における付着生物の生息環境を再現したといえる。

図-3 構築したHSIモデルの検証

(3) 潮下帯における付着生物環境への適用

本研究は、マダイの漁場環境評価を行うことを目的としているため、魚介類の餌料環境に重要な潮下帯の付着生物環境に適用可能か確認を試みた。

まず、図-1に示した定点H13およびH14における1997年から2006年の10年間の水質観測結果⁵⁾（以下、「県水質観測結果」）、同期間における公共用水域調査⁶⁾結果、および瀬戸内海総合水質調査⁷⁾結果を基にHSI値を算出した。また、図-1に示した大阪湾、播磨灘および紀伊水道に面する4地点で、兵庫県が実施した潮下帯において潜水士により採集した検体の分析結果⁸⁾（以下、「県潮下帯調査結果」）を整理し、それを確認種数（潮下帯）として、HSI値との関係について、著者らの研究²⁾において実施したのと同様の方法により改めて検討した。

その結果、図-4に示したとおり、確認種数（潮間帯）

と確認種数（潮下帯）を比較すると、調査方法、調査水深等の調査条件、環境条件等が異なることから、確認種数（潮下帯）は、確認種数（潮間帯）に比べて高くなる傾向となつてはいるものの、図-4中に線形を示したとおり、HSI値と確認種数（潮下帯）との相関係数は $R^2=0.88$ となり、確認種数（潮下帯）は、確認種数（潮間帯）と同様の傾向を示すことを確認できた。

すなわち、マダイなどの魚介類の餌料環境に重要な潮下帯における付着生物の確認種数については、潮間帯とほぼ同じ傾向を示すことが示唆されており、調査が容易に実施できる潮間帯における付着生物の確認種数調査結果を活用することにより、調査地点周辺の潮下帯における付着生物の確認種数の傾向が予測できるといえる。また、HSI値が高い海域は、付着生物の種数が豊富な海域であることから、付着生物を餌料とする魚種にとって餌料環境のポテンシャルが高い海域であるといえる。

図-4 潮間帯と潮下帯における確認種数の関係

(4) マダイの漁業実態との関係

著者らの研究²⁾によると、HSI値の高い海域では魚類の漁獲量および1経営体当りの漁獲量のいずれも多いことが示唆されているが、なかでも漁業上有用な魚種であるマダイについては、雑食性が強く餌条件の良い場所に高密度に分布し、回遊性はあるが岩礁や構造物等を餌場として利用する魚種であること、漁場造成における増殖対象となること等を勘案し、本研究では、マダイを指標魚種として選定した。

構築したHSIモデルに、播磨灘の11観測点における1976年から30年間の県水質観測結果⁵⁾を適用し、各観測点におけるHSI値を算出の上、統計資料⁹⁾より播磨灘における同期間のマダイの漁獲量の推移を整理し、マダイの漁獲量とHSI値との関係について考察した。なお、短期的な水質変動に伴うHSI値の変動やマダイの漁獲量の変動の影響を軽減するために、5年平均値により検討した。

その結果、図-5に示したとおり、マダイの漁獲量については明らかな増加傾向がみられ、HSI値についても年変動はみられたものの、1973年に瀬戸内海環境臨時措置

法（1978年に瀬戸内海環境特別措置法に改正）施行されたことも起因した評価海域の水質改善に伴い1980年代後半以降上昇する傾向が顕著にみられた。なお、1980年代前半以前のHSI値が減少傾向となっているのは、1979年および1984年のCODの観測値が、前後の観測値と比較しても極端に低い値（1.0 mg/L以下）を示した観測月がみられたことに起因してHSI値が高い値となったためである。それら特異値を除去した場合、図-5中に点線で示したとおり全期間においてHSI値は上昇する傾向がみられることを確認しているが、本研究では短期的な水質変動は起こりうるものと考えて、特異値を除去せずに考察を行うこととした。

また、本研究において構築したHSIモデルは、潮間帯における付着生物の確認種数を基に構築したことから、マダイの漁獲量にかかる線形と比較すると、図-6に示したとおり、直線の傾きは異なるものの、両指標の間に相関がみられた。

すなわち、HSI値の上昇傾向に伴い、餌料環境のポテンシャルが向上し、マダイの生息環境が改善されたことにより、マダイの漁獲量は増加した可能性が示唆された。

図-5 HSI値とマダイの漁獲量の推移

図-6 HSI値とマダイの漁獲量との関係

(4) 漁場造成との関係

a) 漁場造成の機能と効果

漁場造成の機能については、魚礁等の構造物に魚介類が集まる蟄集効果や、餌場、産卵場、隠れ場、休憩場等

として利用されることによる魚介類増殖機能があり、魚介類の成長の促進、幼稚魚等の生残率の向上等の効果がある¹⁰⁾ことが知られている。

そのうち、本研究では、漁場造成材料として石材や魚礁等の構造物を投入するとそれらの表面に付着する餌料生物が増加することに着目し、マダイの漁獲量の推移と漁場造成の実績との関係について考察することにより、漁場造成の効果を定量的に評価しようとした。

b) マダイの漁獲量と漁場造成との関係

マダイの漁獲量と漁場造成との関係を考察するため、統計資料⁹⁾より播磨灘におけるマダイの漁獲量の推移を整理し、漁場造成量については、漁場造成の実績¹¹⁾より播磨灘（東播地区、西播地区、淡路西浦地区）における事業量（空 m^3 ）を整理したところ、図-7に示したとおり、漁場造成量の増加に伴い、マダイの漁獲量も増加する傾向がみられた。

図-7 漁場造成とマダイの漁獲量の推移

c) マダイの漁獲量と種苗放流との関係

マダイの漁獲量が増加した要因の一つとして、マダイの漁獲量と瀬戸内海におけるマダイの種苗放流実績¹²⁾との関係についても考察した。

その結果、HSI値の上昇傾向が顕著にみられる1980年代後半以降については、図-8に示したように、毎年70万尾前後のマダイの種苗放流が行われている。また、種苗放流とその効果については、島本¹³⁾によって種苗放流に

図-8 種苗放流とマダイの漁獲量の推移

由来する漁獲量が総漁獲量に占める割合は、1%前後であったことが明らかにされている。

よって、島本¹³⁾による報告以降のマダイの種苗放流量の変動等の状況について、別途考慮する必要があるものの、漁獲量が増加した原因は、漁場造成の効果だけでなく、マダイの種苗放流も一因であろう。

d) マダイの増産漁獲量の試算

マダイの漁獲量が増加した要因について解析するため、基本的に第2の鹿ノ瀬（仮称）構想の推進¹⁴⁾報告書において実施した試算方法に従って、以下のとおりマダイの増産漁獲量を試算しようとした。

まず、漁場造成材料として石材や魚礁等の構造物を投入するとそれらの表面に付着する餌料生物が増加する「増加餌料現存量」については、本研究では県潮下帯調査結果⁹⁾を基に考察し、2005年を $2\text{kg}/\text{m}^2$ とした。過去の増加餌料現存量については、評価海域のHSI値の変動を考慮して、2005年のHSI値と対象年のHSI値との比率を乗じて推定した。

また、「増加餌料生物生産量」は、魚類に餌として利用される年間量として、以下の算定式(2)により推定した。

$$\begin{aligned} \text{増加餌料生物生産量} = \\ \text{増加餌料現存量} \times \text{回転率} \times \text{利用率} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、前出の報告書¹⁴⁾に基づき、回転率：3、利用率：2/3とした。

漁場造成1空 m^3 当りの表面積については、石材の表面積や一般的な魚礁の表面積を勘案し、本研究では、平均的な数値として 1m^2 とした。

また、選好性餌料¹⁵⁾とは、餌料として好まれ最も価値が高い餌料動物のことで、節足動物軟甲類（エビ、カニ等の類）と環形動物多毛類（ゴカイ等）とされており、本研究では県潮下帯調査結果⁹⁾を考察した結果、増加餌料現存量の3%を「選好性増加餌料生物量」として試算した。

推定した選好性増加餌料生物生産量による魚類へ増肉量を基に、マダイの幼稚魚の最大収容尾数に換算し、換算したマダイの幼稚魚尾数が成長後漁獲されるものとし、「幼稚魚収容尾数」は、以下の算定式(3)、(4)により算出した。

$$\begin{aligned} \text{幼稚魚収容尾数} = \text{餌料生物利用量} \\ \times \text{餌料転換効率} \div \text{1尾あたりの増加体重量} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{餌料生物利用量} = \text{選好性増加餌料生物生産量(g)} \\ \times \text{期間率} \times \text{配分比} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、同様に前出の報告書¹⁴⁾に基づき、餌料転換効率：0.13、期間率：3ヶ月/12ヶ月、配分比：0.5、1尾あたりの増加体重量：0.3(g)とした。

算出した幼稚魚収容尾数の値を用いて生残解析¹⁴⁾により1976年から30年間の増産漁獲量を算出した。なお、本研究での増産漁獲量の算出は、漁場造成の1年後、すなわち、1歳魚から7歳魚までを漁獲対象として積み上げ計算を行った。

その結果、図-9に示したとおり、マダイの全漁獲量のうち約2割については、漁場造成に伴う餌料の増加が寄与する可能性が示唆された。

よって、漁場造成に伴う餌料の増加以外の魚介類増殖機能、マダイの種苗放流、地域の漁業実態や資源管理の効果等を別途考慮する必要があるものの、魚介類の餌料となる付着生物の生息環境の改善による餌料環境のポテンシャルの向上に加えて、漁場造成に伴う餌料の増加に伴い、マダイの生息環境は向上し、マダイの漁獲量は増加傾向を示したといえる。

図-9 HSI値とマダイの増産漁獲量との関係

3. 主要な結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 現地調査で得られた付着生物の確認種数調査結果と水質調査結果より HEP による予測モデルを構築し、付着生物の生息環境を再現した。
- 2) 調査が容易に実施できる潮間帯における付着生物の確認種数調査結果を活用することにより、調査地点周辺の潮下帯における確認種数の傾向が予測できる。
- 3) HSI 値が高い海域は、付着生物の種数が豊富な海域であることから、付着生物を餌料とする魚種にとって餌料環境のポテンシャルが高い海域である。
- 4) HSI値の上昇傾向に伴い、餌料環境のポテンシャルが向上し、マダイの生息環境は改善したことにより、マダイの漁獲量は増加した可能性が示唆された。

5)マダイの全漁獲量のうち約2割については、漁場造成に伴う餌料の増加が寄与する可能性が示唆され、漁場造成に伴う餌料の増加に伴い、マダイの生息環境は向上し、マダイの漁獲量は増加傾向を示した。

以上をまとめると、本研究により得られた HEP を応用して構築した予測モデルは、評価海域の漁獲量の傾向だけでなく、マダイの餌料環境に着目した漁場環境評価に活用できることが示唆された。

4. 今後の課題

本研究は、HEPの考え方を応用し、付着生物調査結果を基に構築したHSIモデルをマダイの漁場環境評価に適用したものであるが、付着生物調査結果より予測モデルを構築するだけでなく、HEPを用いて直接マダイを対象とする予測モデルを構築した場合についても検討することが望ましいと考える。

また、本研究では別途考慮することとした、漁場造成に伴う餌料の増加以外の魚介類増殖機能やマダイの種苗放流等の効果も加えた評価とすることも今後の課題である。

漁場環境を定量的に評価した上で自然再生事業等を実施することは極めて重要であり、本研究結果が事業効果の算定等に資するための一助となれば幸いである。

謝辞：本研究の遂行にあたり、現地調査に助力してくれた関西大学環境都市工学部の学生諸君ならびに貴重なデータをご提供いただいた関係官庁の各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中章：HEP 入門<ハビタット評価手続き>マニュアル，朝倉書店，2006。
- 2) 市瀬友啓，島田広昭，加藤官司，高木英男，中桐栄：潮間帯における付着生物と水質を指標とした漁場環境評価手法に関する研究，海洋開発論文集，第26巻，pp.1281-1286，2010。
- 3) 橋中秀典，井上雅夫，島田広昭，田中賢治，西澤博志：豊かな付着動物相の形成を目指した人工磯の適地選定手法，海岸工学論文集，第50巻，pp.1216-1220，2003。
- 4) 社団法人日本水産資源保護協会：水産用水基準（2005年版），平成18年3月。
- 5) 水質観測結果：（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター調べ）
- 6) 公共用水域調査：<http://www-gis.nies.go.jp/>
- 7) 瀬戸内海総合水質調査：<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/suishitu/>
- 8) 県潮下帯調査結果：（兵庫県調べ）
- 9) 兵庫農林統計協会：兵庫県水産業の動き（平成9-18年）。
- 10) 水産庁漁港漁場整備部・財団法人漁港漁場漁村技術研究所：魚礁における増殖機能の便益計測マニュアル（平成19年3月）。
- 11) 漁業造成の実績：（兵庫県調べ）
- 12) 兵庫県：ひょうごみどり白書2008（平成20年12月）。
- 13) 島本信夫：瀬戸内海東部海域におけるマダイの資源変動および栽培漁業に関する研究，兵庫水試研究(35)，pp.89-98，1999。
- 14) 兵庫県・財団法人漁港漁場漁村技術研究所：第2の鹿ノ瀬（仮称）構想の推進（平成22年3月）。
- 15) 水産庁漁港漁場整備部・財団法人漁港漁場漁村技術研究所：平成15年度水産基盤整備生物調査「原単位把握のための調査」（魚礁事業における増殖効果指標検討調査）報告書（平成16年3月）。

ENVIRONMENTAL EVALUATION MODEL OF RED SEA BREAM WAS CONSTRUCTED BY APPLYING THE HEP

Tomohiro ICHISE, Sakae NAKAGIRI, Hiroaki SHIMADA, and Masaru KOBAYASHI

In order to contribute to the stabilization of fishery management and the sustainability of fishery resources, fishery development projects have been carried out. However, about continuous monitoring surveys, it is not easy to assess these project effects on the relation between fishery and environment because of increasing research cost. In this study, we apply HEP(predictive model) to the environmental assessment in red sea bream fishery, the following conclusions are drawn. Of potential prey environment is improved, catches of red sea bream was increased. For about 20% of the total catch of red sea bream, improvement is suggested. Therefore, it is suggested that the model can be used for the environmental assessment of red sea bream.