

持続可能な藻場環境の管理及び収益の最適化

川本 樹¹・玉置 哲也²

¹ 学生会員 香川大学大学院 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: s22g257@kagawa-u.ac.jp

² 正会員 香川大学創造工学部 環境デザイン工学領域 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: tamaki.tetsuya@kagawa-u.ac.jp

藻場は魚介類の生活の場や海中の二酸化炭素の吸収、酸素の供給などの大きな役割を果たしている。しかし、近年の気候変動による環境の変化や地球温暖化に伴う海水温の上昇によって藻場を形成する海藻の生産とウニをはじめとした植食生物の食圧のバランスが崩れ、磯焼けの発生が深刻化している。磯焼けはコンブといった商品価値のある海藻の減少だけでなく、商品価値の見込めないウニの増殖を引き起こし、沿岸環境だけでなく漁業への影響も看過できないものである。近年では、ウニとコンブの共生に向けた昆布の食害回避技術が提案されているが、そのような技術を利用した藻場の管理手法については十分議論されていない。そこで本研究では、良好な藻場の維持管理を行いつつ、ウニおよびコンブの収穫によって得られる収益最適化モデルを提案する。

Key Words: Revenue managements, Seaweed beds, Sustainability, Sea urchin, Ecology

1. はじめに

近年、国際的な持続可能な開発目標(SDGs)のうちの一つの目標(14.「海の豊かさを守ろう」)の中で掲げられているように海洋生態系の保全をはじめとした海洋資源の持続的な管理や保護が求められている¹⁾。元来、我々は自然からの恵みを楽しむことで生活を営んできた。しかしながら、資源の過剰利用や地球温暖化による生態系の変化によって、従来の生態系が失われてしまうリスクが高まっている。持続可能な社会を作り上げていくためにも、生態系から得られる資源の適切な管理が必要とされている。

日本は海に囲まれた島国であり、多くの資源を海から得ている。その中でも、藻場は海洋生物の産卵場や稚魚の生息場所としての機能やウニやブダイといった主に海藻を食べる生物の餌場としての役割を有しており、生物多様性の維持に貢献している。また、大型海藻が生長時に窒素やリンなどの栄養塩を吸収し、赤潮の原因である植物プランクトンの急激な繁殖を抑えるほかに²⁾、近年では地球温暖化の防止において、二酸化炭素の固定先としてブルーカーボンが注目されているなど、環境保全の面でも藻場はその役割が期待されている。しかし、気候変動による環境の変化や地球温暖化に伴う海水温の上昇によって藻場を形成している海藻の生産とウニをはじめ

とした植食生物の食圧のバランスが崩れ、磯焼けの発生が深刻化している。磯焼けは藻場が季節的消長や多少の経年変化の範囲を超えて著しく衰退または消失して貧植生状態となる現象で、発生すると藻場の回復に長い年月を要することになる³⁾。また、磯焼けはコンブといった商品価値のある海藻の減少だけではなく、餌となるコンブを十分に食べることができずに中身が育ち切っていない商品価値の見込めないウニの増殖を引き起こし、沿岸環境だけでなく漁業への影響も看過できないものになっている。磯焼け対策を行っている地区の事例として田村⁴⁾の報告によると、大分県佐伯市名護屋地区では藻場の回復と磯根資源の減少を防止するために藻場を再生するための母藻移植、ウニ類の食害を防ぐためのウニフェンスの設置とウニ除去を行い、効果的であると判断した。また、南里ら⁵⁾の長崎県新三重地区における磯焼け対策の報告によるとウニフェンスの設置とウニの除去を行い、ウニ密度を1個体/m²未満に保ち、母藻の供給を組み合わせることによって藻場を回復させることができた。しかし、ウニの生息密度が低くウニの漁場としての利用価値が極めて小さくなってしまったといった課題も見られた。そのほかの対策として、コンブのロープ養殖が挙げられる。山下ら⁶⁾の研究によると、海中ロープによるコンブの養殖はウニの摂食の影響がほとんどなく、コストも低く抑えられるといったメリットがあり、磯焼け対策に有

効だとしている。ただ、ロープの設置が難しく一部のロープにコンブ類ではなくアサオが漂着し、飼料価値の高いコンブが着生しなくなるといった問題が挙げられた。また、山本ら⁷⁾はウニとコンブの共生を視野に可動式のコンブの食害回避技術を提案しているが、そのような技術を利用した藻場の管理手法については十分に議論されていない。

そこで本研究では、良好な藻場の維持管理を行いつつ、ウニおよびコンブの収穫によって得られる収益を最適化する、収益管理モデルを提案する。生態系から得られる資源の管理に関する研究として、吉本⁸⁾は林分成長モデルを用いて最適間伐戦略を探索する林分経営最適化モデルの構築した。また、太田ら⁹⁾は植栽密度ごとに植栽から主伐までの林業経営体の収益の現在価値を最大化する間伐計画と主伐期を求めた。Skonhofs et al.¹⁰⁾は羊牧場の管理として、牧草と頭数の生態的な持続性を考慮した収益モデルを提案している。また、Martinet and Blanchard¹¹⁾はフランス領ギアナにおける小エビ漁業がもたらす生態系へのトレードオフに着目し、漁業と自然保護活動の両立の可能性について分析を行っている。小エビ漁業による混獲や乱獲は海洋生態系の悪化につながっているが、一方で混獲されて廃棄された資源が保護対象の海鳥のえさとなる正の外部性も有している。Martinet and Blanchard は Viability kernel を用いて実現可能な管理策の可能性を示している。このように、生態系保全は単に自然環境の保全を訴えるだけでなく、その地で生活する人々の持続可能性も含めた提案をしなければ、実行可能な提案とはならないだろう。本研究が対象とする磯焼けに関しても、生態系の保全だけでなく、その収益性の最適化を目指す。

2. 提案モデル

良好な藻場を維持しつつ、ウニによる収益とコンブによる収益の合計である総収入を最大化する数理モデルを提案する。t 期のコンブの量、ウニの量をそれぞれ $X(t)$ 、 $Y(t)$ とする。本研究では、コンブはその地域の環境収容力 K に依存して成長するのに対し、ウニの量は外生変数として考える。つまり、t+1 期におけるコンブの量および、ウニの量を

$$X(t+1) = X(t) + rX(t) \left[1 - \frac{X(t)}{K} \right] - Q(t)Y(t), \quad (1)$$

$$Y(t+1) = \gamma Y(t) \quad (2)$$

と仮定する。式(1)の第 2 項はコンブの成長による増加を表すもので、環境収容力 K および成長パラメータ r によって成長速度が変化する。第 3 項はウニによる食害を表すものであり、ここで $Q(t)$ は単位ウニあたりの食害量とする。つまり、

$$Q(t) = \frac{\bar{M}e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}} [e^{\alpha(1-\mu(t))} - 1] \quad (3)$$

と仮定する ($Q \geq 0$)。 \bar{M} が単位ウニあたりによる最大の摂餌量であり、 α は調整パラメータである。 $\mu(t)$ はウニによる食圧を管理するコントロール変数であり、 $[0,1]$ の区間で制御レベルをコントロールするものとする。つまり、0 においてウニによる食害対策を全くとっていない場合、1 において実行可能な最大レベルの食害対策が取られている場合を示している。式(2)は初期値とその後の増減率 γ によってウニの個体数が決定することを示している。次に t 期における単位ウニあたりの価値 $P(t)$ について考える。この時、

$$P(t+1) = (1 - \delta)P(t) - \left[\frac{n}{Q(t) + b} + \bar{P} \right] \quad (4)$$

ウニは飢餓に強いので、エサが乏しくても生存することができるが、商品価値のないウニとして成長する。そこで、エサが全くない場合において、価値は減衰パラメータ δ に従って価値が減少する。一方で、第 2 項に示すように摂餌によって価値が増加する。1 期当たりの価値増加の上界値を \bar{P} 、 $b (=n/\bar{P})$ 、 $n (>0)$ は調整パラメータとする。

収益 π については、最終期のコンブの量、ウニの量、ウニの価値より、

$$\pi = qX(T) + P(T)Y(T) - \sum_{t=1}^T c\mu(t) \quad (5)$$

とする。ここで q は単位コンブあたりの価値、 c は食害をコントロールすることにかかる費用とする。

以上のモデルを用い、収益を最大化させる最適な食圧の制御を試みる。

3. 結果

(1) コンブの環境収容力の変化による影響

図-1 にコンブの環境収容力 K を変化させた際の食圧を管理するコントロールレベルを示す。横軸は期、縦軸は食圧管理レベル $\mu(t)$ を表している。 K 以外のパラメータは ($r, \bar{M}, \alpha, \gamma, \delta, \bar{P}, b, n, q, c$) = (1, 10, 5, 1, 0.1, 10, 0.5, 5, 5, 100) とした。食圧の管理レベルが最大の $\mu(t)=1$ からはじまり、t=5 前後から管理を和らげて

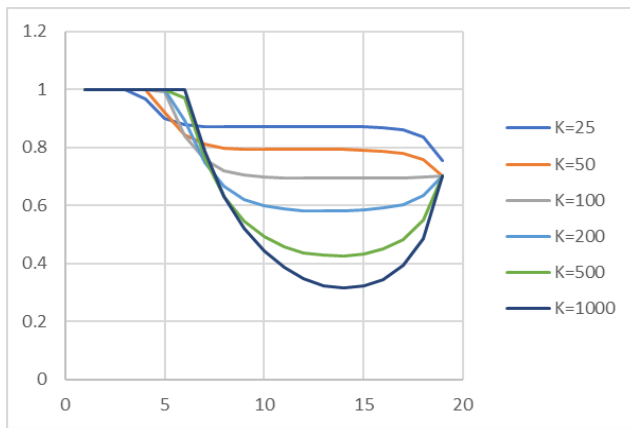


図-1 環境収容力の変化による影響

いる。環境収容力が小さい場合、コンブが十分に成長していない早い段階で食圧管理レベルを引き下げているが、その後は大きく管理レベルを引き下げない。一方環境収容力が大きい場合、一定の成長までは厳しい食圧のコントロールを行い、その後大きく管理レベルを引き下げている。また、 $K > 100$ においては最終期が近くなるにつれて再度管理レベルを引き上げている。つまり、コンブの生育環境が乏しい場合には、コンブが大きく成長した後でもコンブの再生能力に対してウニの食圧は大きな影響を及ぼすため厳しい管理を継続する必要がある。そのため、収穫期が近くなっても十分な餌をウニに与えて価値を向上させることが困難なので、早い段階から管理レベルを下げていると考えられる。コンブの生育環境が豊富な場合には、コンブの再生能力によって復元できる程度で管理レベルを引き下げることが可能となり、ウニの価値上昇を見込むことが可能となる。

(2) 単位コンブあたりの価値変化による影響

図-2 に単位コンブあたりの価値 q を変化させた際の食圧を管理するコントロールレベルを示す。横軸は期、縦軸は食圧管理レベル $\mu(t)$ を表している。 q 以外のパラメータは $(r, \bar{M}, \alpha, \gamma, \delta, \bar{P}, b, n, K, c) = (1, 10, 5, 1, 0.1, 10, 0.5, 5, 100, 100)$ とした。こちらも食圧の管理レベルが最大の $\mu(t)=1$ から始まり、 $t=5$ 前後から管理を和らげ、 $t=10$ から $t=15$ までの期間は $\mu(t)=0.7$ を保っている。これはウニの価値増加とコンブの成長量のバランスが均衡しているためと考えられる。収穫期が近くなると、単位コンブあたりの価値が高い場合はウニの食害によるコンブの量が減少することを防ぐために管理レベルを上げている。コンブの成長速度がウニの成長速度よりも速いため、早い段階で管理レベルを下げウニの価値を高めつつ、収穫時期間に管理を強めることでコンブの量を増加させ、収益を増やす行動がとられている。一方で、単位コンブあたりの価値が低い場合、ウニの摂餌量と均衡がとれているコンブの量を維持するよりも管

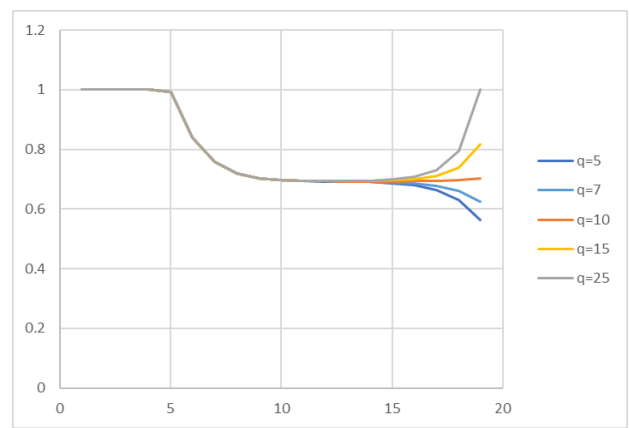


図-2 単位コンブあたりの価値の変化による影響

理コストを抑え、ウニの価値を高めるほうが効率的となり食圧管理レベルを高めることとなる。

4. 考察

コンブの量 $X(t)$ の環境収容力およびの単位コンブあたりの価値の違いによって、ウニの食圧管理レベル $\mu(t)$ がどのように変化するか明らかにした。まず、初期においてはコンブが十分に成長していないため、一定水準に達するまでの保全が必要である。全期中盤においてはウニとコンブの成長バランスが効率的になるような制御水準に引き下げ、収穫期ごろにおいて管理費用やコンブ・ウニの相対的な価値によって再度食圧管理を行うことが望ましいと言える。今後は、パラメータや関数の推計によって実証分析を目指す。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費(基盤研究(若手) 19K15114)による助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 農林水産省：SDGs の目標とターゲット
- 2) 環境省：環日本海海洋環境ウォッチ、https://ocean.nowpap3.go.jp/?page_id=540
- 3) 水産庁：磯焼け対策ガイドライン
- 4) 田村真弓：藻場形成による豊かな海の森づくり，2008
- 5) 南里 海児，中嶋 泰，八谷 光介，清本 節夫，安藤 亘，吉村 拓：長崎県新三重地区における磯焼け対策について，日本水産工学会誌，48 巻 1 号 p.59-64，2011
- 6) 山下俊彦，猿渡亜由未，渡辺航希，佐藤旬，佐藤仁：北海道南西日本海沿岸の磯焼け対策としてのコンブのロープ養殖に関する研究，
- 7) 山本貴史，玉置哲也，岡崎慎一郎，吉田秀典，末永慶寛：震災海域における海藻とウニの共生技術の開発，2022.
- 8) 吉本敦：MSPATH アルゴリズムを用いた動的計画法による林分経営最適化モデル，統計数理，51 巻 1 号 p.73-94，2003
- 9) 太田徹志，高比良聡，中間康介，吉田茂二郎，溝上展

也：伐採収益と植栽軽費の観点からみた低密度植栽の有効性, 日本森林学会誌, 95 卷 2 号 p.126-133, 2013

- 10) Anders Skonhøft, Gunnar Austrheim, Atle Msterud : A BIOECONOMIC SHEEP-VEGETATION TRADE-OFFMODEL: AN ANALYSIS OF THE NORDIC SHEEPFARMING SYSTEM, NATURAL RESOURCE MODELING, Vol.23, p.354-380
- 11) Vincent Martinet, Fabian Blanchard : Fishery externalities and biodiversity: Trade-offs between the viability of shrimp trawling and the conservation of Frigatebirds in French Guiana, Ecological Economics, Vol.68, p.2960-2968, 2009

(?)