

卒業論文

磯焼け被害とウニの個体数管理

—野菜残渣を利用したムラサキウニ養殖—

慶應義塾大学経済学部

大沼あゆみ研究会第15期

学籍番号 21720291

布野智大

“Take the first step in faith. You don’t have to see the whole staircase, just take the first step.”

Martin Luther King, Jr.

要旨

近年、海藻の群落（藻場）が大規模に消失する「磯焼け」と呼ばれる現象が全国各地の沿岸部で見られている。磯焼けの原因は様々であり、高水温や海流の変化、貧栄養化・富栄養化、水質汚濁、魚介類の乱獲、食害生物の増加などが挙げられる。これら原因は単独では存在せず、複合して影響を及ぼしている。特にウニや、温暖化によって活動域が広がった南方系植食性魚類であるアイゴによる食害被害が多くみられている。いったん海藻の生産力が低下することで、食害生物の摂食圧が相対的に高まり、藻場の消失を長期化させている。

日本においてウニは高級食品として親しまれているが、磯焼け区域のウニは食用ではなく、駆除対象である。なぜなら、ウニは非常に飢餓に強く、磯焼け発生地域のウニは身入りが悪く、商品価値がないためである。そのため、政府の補助金政策の下で漁業関係者によって駆除が行われてきた。他の対策としては、防御フェンスの設置などであった。

このような状況の中、2018年に神奈川県水産技術センターがキャベツによるウニ養殖に成功した。小田原市では、2019年から実際にキャベツで育ったウニが出荷された。しかし、この養殖技術は完全に確立されたわけではなく、全国でも成功例も少ない。仮に全国的に実用化の段階にまで運ぶことが出来れば、今後の日本の水産業、特に養殖業の発展に寄与するものと期待できる。

そこで、磯焼け対策としてウニ養殖によるウニの個体数管理を提言する。先行研究によって、ウニの駆除が磯焼け対策として有用であることが報告されている。本稿では、ウニ養殖の導入によって、漁師に対して自発的な海洋環境保護へのインセンティブを与えるシステムの構築を目指している。当該政策は、駆除対象のウニと野菜残渣（規格外キャベツ等）の利用による資源の有効活用が可能である。また、磯焼け対策の中心を担う漁業者の後継者不足が深刻化しており、ウニ養殖事業には、若手漁師主導という漁業後継者育成事業としての側面を持たせる。

本稿では、当該政策提言に対してNPV法によってプロジェクトを評価し、さらにロジスティック関数を用いたモデル分析を行う。初めに、NPV法による分析によって、NPVと養殖プロジェクトが実現されるウニの販売価格との関係を導き出し、ウニ養殖プロジェクトは実現可能だと結論づけた。次に、ロジスティック関数を用いたモデル分析では、ウニ養殖の有無によって、漁師の目的関数の最大化条件から算出した採取努力 E の差を比較し、ウニ養殖がウニの個体数 S_t にどれほど影響があるかを導き出した。最後に、この2つの分析結果から、野菜残渣によるウニ養殖の実用化を進める事の将来的な有用性を明らかにした。

キーワード：磯焼け、ウニ、ウニ養殖、ロジスティック関数

目次

第1節 現状分析.....	6
第1項 (1.1) 磯焼け被害.....	6
1.1.1 磯焼けの定義と藻場の機能.....	6
1.1.2 磯焼けの原因.....	7
第2項 (1.2) ウニや植食性魚類による食害.....	8
第3項 (1.3) 磯焼けの増加と拡大.....	10
第2節 問題提起.....	11
第1項 (2.1) 現在の対策.....	11
2.1.1 ウニの駆除.....	11
2.1.2 駆除されたウニの有効利用.....	12
第2項 (2.2) 現状の問題点.....	13
第3節 政策提言.....	13
第1項 (3.1) 政策提言概要.....	13
第2項 (3.2) 先行研究と本稿の位置づけ.....	14
3.2.1 先行研究.....	14
3.2.2 本稿の独自性.....	15
第3項 (3.3) 野菜残渣を利用したムラサキウニ養殖.....	15
3.3.1 神奈川県水産技術センターにおけるキャベツによるムラサキウニ養殖.....	15
3.3.1 小田原市における野菜残渣を利用したムラサキウニ養殖試験事業.....	16
第4項 (3.4) 政策の可能性と問題点.....	18
第4節 モデル分析.....	19
第1項 (4.1) NVP法によるプロジェクト分析.....	19
4.1.1 NVP法による分析を行うにあたって.....	19
4.1.2 各種コスト算出.....	19
4.1.3 NPV算出とシミュレーション.....	20
4.1.4 プロジェクト評価.....	23
第2項 (4.2) ロジスティック関数とウニの個体数管理.....	24
4.2.1 ロジスティクス曲線.....	24

4.2.2 漁師の目的関数と最大化条件	24
4.2.3 ウニの個体数管理のシミュレーション	27
第5節 結論	31
参考文献	33
あとがき	35

第1節 現状分析

第1項 (1.1) 磯焼け被害

1.1.1 磯焼けの定義と藻場の機能

磯焼けとは、「浅海の岩礁・転石域において海藻の群落（藻場¹）が季節的消長や多少の経年変化の範囲を越えて著しく衰退または消失して貧植生状態となる現象」（藤田，2002a）である。一度磯焼けが発生すると、回復までに長い年月を要し、また、最悪の場合には磯焼けの状態に固定化されてしまう（藤田,2002b）。

藻場は、沿岸水域での海洋生態系にとって非常に重要な存在である。藻場は、産卵や幼稚仔魚の育成の場を提供し、水中の有機物を分解し、栄養塩類や炭酸ガスを吸収し酸素を提供する等により水質を浄化し、さらには海岸線の保全（波浪の抑制と底質の安定）にも大きな役割を果たしている（表 1-1）。また、人間に直接かかわりのある機能として環境学習やレジャー空間も挙げられる（表 1-2）。このような多面的機能を有する藻場の大規模な衰退・消失は、海洋生態系に大きな悪影響を及ぼし、さらには水産資源の安定供給が維持できなくなる可能性をもたらす。周囲を海に囲まれている日本において、磯焼け被害による水産業界への打撃は大きな懸念点となる。

表 1-1 藻場の機能

機能	説明
①基礎生産	太陽の光エネルギーを補足・炭素固定
②栄養吸収	栄養塩（窒素、リン、微量元素）を吸収、滞留・循環
③食物供給	消費・分解者に食物を供給
④環境創生	着生（内生）基礎、小空間、隠蔽用の色彩環境を創生
⑤環境緩和	光や海水流動など物理的環境を緩和
⑥生物選択	優占種の構造・分布・化学シグナルにより利用生物を選択・制限
⑦環境輸出	寄り藻、流れ藻、打ち上げ藻を供給

原出典：藤田(2001)

出典：水産庁(2015),p.4

¹ 藻場は、沿岸の浅海域において海藻あるいは海草が繁茂している場所あるいはそれらの群落や群落内の動物を含めた群集のこと（水産庁,2015,p.3）

表 1-2 魚介類・人間による藻場の利用

利用	主体	説明
①生活	魚介類	執念定住、季節定住
②再生産	魚介類	産卵場、幼稚保育場
③食物供給	魚介類・人間	索餌場、海藻や魚介類の漁場
④アメニティ	魚介類・人間	彩り・磯の香り
⑤原料供給	人間	寒天・医薬原料等
⑥環境指標	人間	貧栄養-富栄養、自然度等
⑦富栄養化防止	人間	過剰栄養の吸収
⑧養殖場	人間	養殖用種苗の放流スポット
⑨レジャー空間	人間	ダイビング・遊覧船・遊漁

原出典：藤田(2001)

出典：水産庁(2015),p.4

1.1.2 磯焼けの原因

磯焼けが発生する原因は様々であり、各項目を表 1-3 に示した。もっとも、磯焼けの原因は各海域の地形、海洋学的特性、生物の種組成、沿岸利用の歴史などによって当然異なる。

気象・海況の変化に伴って直接発生する例としては、エルニーニョの発生や黒潮流軸の接岸に伴う記録的な高水温・貧栄養、台風による激浪等である。生物相の変化に伴う例としては、ウニ・魚類など藻食動物の摂餌圧の増大が挙げられる。人間の活動が関わる場合としては、生活・産業排水の流入に伴う汚濁・富栄養化、河川改修や護岸整備に伴う海水の停滞・懸濁物質・堆積浮泥の増加、哺乳類・魚介類（ウニなど藻食動物の捕食者）の乱獲である。その他の事例としては火山灰の堆積などが挙げられる（藤田,2002a）。

つまり、日本国内において磯焼けが発生・継続するしくみは、「①植食動物による食害、②海藻の枯死、③海藻が芽生えなくなる、④海藻の流失の 4 つ」（水産庁,2015）に大別でき、これらが単独、または複合した結果によるということになる。

一時的な原因や一定のサイクルで起こる気象・海況の変動による場合、磯焼けの持続期間は数年程度にとどまる。しかし、上記磯焼けの原因によって海藻の成長が阻害され、それが持続する場合には、磯焼けの持続時間は十数年から半世紀以上にも及ぶ。不可逆的な環境変動が起こってしまった場合には、自然には海藻植生は回復せず、磯焼けが固定化されてしまう。

表 1-3 日本における磯焼けの原因

項目	例	説明・備考
①海況の変化	黒潮・対馬暖流の優勢・接岸、親潮第一分岐の離岸、流水接岸	夏季、または冬季の高水温
②栄養塩の欠乏	砂防ダムの増加、沢水・河川水の流入減少・拡散防止	窒素、リン不足
③淡水流入の影響	山林伐採、豪雨・長雨、ダム排砂	出水時の浮泥堆積や海水の濁り
④天候の異変	台風・暖冬	海藻の脱落
⑤植食動物の食害	ウニ、サザエ、アメフラシ、小型巻貝、植食性魚類（アイゴ、ブダイ、ニザダイ等）	ウニ・魚以外は副次的な影響にとどまる
⑥海底基質の占有	無節サンゴモ、サンゴ、サンゴイソギンチャク等	海藻の減退域で繁殖し、海藻よりも優勢になる
⑦海底基質の埋没	火山灰、漂砂、浮泥	火山噴火、沿岸・河川の改変による砂泥の堆積
⑧公害	鉱山・工業・生活排水、発電所温水、河川改修、埋立、農薬	沿岸の汚染は減少しているが、沿岸構造物の増加による泥の堆積、植食動物の定住の促進
⑨漁業・増養殖	漁場酷使、海藻類の過剰採取、漁場改良、ウニの深浅移植、ウニ・貝の過剰放流	漁場改良、ウニの深浅移植による磯焼けの持続・増加

水産庁(2015),p.16 を改変

第 2 項 (1.2) ウニや植食性魚類による食害

前節で述べたように、①食害だけが磯焼けの原因ではなく、基本的には複合的な要因による。近年、食害による磯焼けの被害が顕著であり、注目度が上がるとともに、喫緊の課題となった。そこで、本節では、前節 1.1.2 で述べた磯焼けの原因の①植食動物による食害に着目する。

海藻を食べる動物は数多く存在し、代表的なものとしてウニ、魚、巻貝、ウミガメ、海鳥が挙げられる。磯焼けの原因となるのはウニと植食性魚類の 2 つである。最も古いウニによる磯焼けの記録は、19 世紀半ばのノルウェー沿岸であり、日本でも 1940 年代には礼文島においてウニによるコンブ礁の破壊が確認されている（藤田,2002b）。ウニによって磯焼けが発生し、ウニが高密度となり不毛域となっている区域を特に「ウニ焼け」と呼ぶこともある。前節の②～④の磯焼けの理由によって一旦海藻類の生産力が低下すると、ウニや植食性動物の摂食圧が相対的に高まる。その結果、植食動物の摂食圧が海藻類の生産力を上回り、植食動物の食害によって藻場の衰退が始まる。植食動物の摂食圧が高い状態が継続する場合には、藻場の大規模な衰退・消失につながる。特にウニは飢餓に強いいため、周囲の海藻を

食べ尽くしたとしても、生き続けることができる。そのため、最終的には海藻がまったく成長できない環境が完成し、磯焼けが固定化されてしまうのである。



図 1-4 駆除された身がないムラサキウニ

出典：臼井他(2018),p.11.

水産庁が行った 2005 年のアンケート調査によると、磯焼けを発生させるウニとしてキタムラサキウニ、エゾバフンウニ、ムラサキウニ、バフンウニ、ガンガゼ、タワシウニ、ナガウニの 7 種が挙げられた。水産庁(2015)は、「ウニの種や殻径サイズによって摂食能力が異なるため、単純に比較はできないが、1 m²当たり 5~10 匹以上のウニが分布していると磯焼けが継続する。海藻の現存量が少なく、ウニが摂食しやすい静穏な海域であれば、より少ないウニ密度でも藻場の回復は困難となる」(p.31)と述べている。

北日本（東北地方太平洋沿岸や北海道日本海沿岸等）では、特にキタムラサキウニやエゾバフンウニの食害によって藻場の大規模な衰退・消失が引き起こされている。東北地方太平洋沿岸では、震災後、ウニの個体数が増加しており、磯焼けの拡大が懸念されている。東日本では、従来はムラサキウニによる食害が報告されていたが、近年では、温暖化の影響によりガンガゼなどの熱帯・亜熱帯系のウニによる磯焼け被害が認められている。

ウニによる食害被害が深刻化した理由は、漁獲によって捕食生物が減少し、捕食圧から解放されたこと、稚ウニの放流・深浅移植²、水温上昇、人工的な居住・繁殖地の提供等が挙げられる（水産庁,2015）。また、安価な輸入品の台頭によって、国内でウニの漁獲量が減少することも危惧されている。ウニの増加理由も磯焼けの原因と同様に、様々な要因が複合した結果によるものである。一方、アイゴ、ブダイ、ニザダイ等は南方系植食性魚類であり、従来は熱帯・亜熱帯域に生息しており、一部が日本（温帯域）まで分布している。植食性魚類による食害被害が顕在化してきた大きな原因は、ガンガゼと同様に温暖化の影響による水温上昇に伴う生息域の北上・拡大である。

² 除去された身入りの悪いウニを沖側（深所）から岸側（浅所）の藻場へ移植し、一定期間海藻を食べさせて、身入りが改善したところで再び捕獲することである。

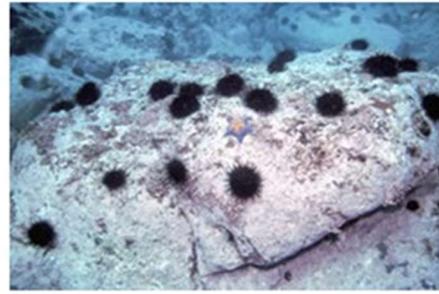


図 1-4 葉の部分が魚に食べつくされたカジメ³場（左）とウニの食害による裸地化（右）

出典：水産庁(2007)⁴

第 3 項 (1.3) 磯焼けの増加と拡大

日本では明治時代中頃から磯焼けの認識が高まってきた。藤田(2002a)は、「遠藤吉三郎(1873~1920)が世界で最も古い記録と思われる 1830 年代の下北半島におけるコンブ群落の衰退の事例を採録した。その後、1890 年代になると、学会で磯焼けが取り上げられるようになり、アラメ⁵・カジメ群落の衰退とそれに伴うアワビの減少やテングサ群落の衰退について論じられた」と述べている。

20 世紀末(1980 年頃)には、調査を通して磯焼けによる藻場の衰退やその継続が明らかになった。環境庁自然保護局(1994)の調査では、日本全国の藻場の総面積は 201,212ha であり、前回調査後の約 13 年間に現存藻場面積の 3.18%にあたる 6,403ha の藻場が消滅したと述べられている。藻場消滅の原因は、埋立等直接改変 28.1%、磯焼け 14.7%、その他海況変化等 16.2%、不明 40.6%等と集計された。水産庁(2015)は、「1990 年代には、静岡県御前崎の 1 地先だけでも約 8,000ha の藻場が磯焼け現象として消失した(一部は回復)」と述べている。

2015 年時点の聞き取り・実地調査(水産庁,2015)によると、海と隣接しているほぼすべての都道府県で磯焼け被害が報告されている(図 1-5)。以上より、1830 年代に日本初の磯焼けが確認された以後、磯焼けは増加傾向にあることは明らかである。

³海藻の一種であり、コンブ目コンブ科カジメ属の海藻である。

⁴ 水産庁(2007)、「藻場の働きと現状」,<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/index.html>,参照日 2020 年 12 月 25 日。

⁵海藻の一種であり、コンブ目コンブ科アラメ属の海藻である。

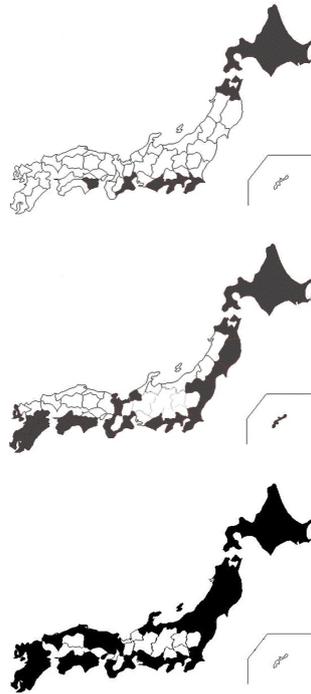


図 1-5 藻場衰退が報告された都道府県

上段：1900 年頃、中段：1980 年、下段：2015 年頃

原出典：伊藤他(2006)

出典：水産庁(2015),p.23

第 2 節 問題提起

第 1 項 (2.1) 現在の対策

2.1.1 ウニの駆除

ここでは、本稿のテーマであるウニによる磯焼けへの対策を述べていく。前節の通り、磯焼けは複数の要因によって引き起こされることもあり、そのような場合には複数の対策を組み合わせる必要があることに留意する必要がある。

ウニによる食害への基本的な対策は、対象区域からウニを除去し、ウニの密度を下げることである。ウニの除去は、スキューバダイビングで潜水してウニ鉤等によってウニを書き出

してハンマーで潰す、または捕獲によってウニの生息密度を低下させている。潰す際には、完全に潰す、あるいは半分に割るなどしている。ウニを回収する場合は、タモや網袋に回収し、一定数捕獲した段階で船上に運び上げている（水産庁,2015,p.73-82）。

漁業調整規則の制限を受ける海域では、素潜り、または船上から挟み棒等を用いる方法、餌入りのカゴを海底に沈める方法で除去が行われている。これらの方法は作業範囲が限定的で、作業効率もスキューバ潜水に比べて劣るとされている。これら2つの方法に関して、「船上からのウニの除去は、漁師が小型船から箱メガネで海中を覗き、突き棒やヤス、タモ網で捕獲して行う。ただし、除去できるのは海面から見えるウニに限られ、海底の亀裂や岩の隙間に潜むウニの除去は難しく、海水の透明度にも左右される。カゴを海底に沈める方法は、ウニの餌となる海藻や魚肉の入ったカゴを海底に設置し、ウニが集まったところでカゴを引き揚げて捕獲する方法である。海水の透明度が悪い海域や水深の深い場所で実施されるが、カゴの効率的な配置、効果のある餌料、除去効果等検討すべき課題が多いことから実施例が少なくなっている」（p.86-87）と説明されている。

このほかに、フェンスやカゴで藻場を囲い、ウニの侵入を防ぐことで海藻を防御する方法がある。水産庁(2015,p.73)では、フェンスやカゴで藻場を囲う方法は、特定の範囲をウニの食害から保護して濃密な藻場を形成させることによって、核藻場として周囲に海藻のタネを供給させることができると述べられている。前述の方法でウニを除去し、除去した区画にフェンスを設置すると藻場の回復に効果的である。しかし、藻場が形成される範囲は限定的であり、フェンスやカゴは波浪等で破損しやすく、メンテナンスにかかる時間・経費が課題である。

2.1.2 駆除されたウニの有効利用

駆除されたウニの中で食用のエゾバフンウニやムラサキウニの場合は、深浅移植、または肥育による身入りの改善が行われることがある。一方で、非食用であるガンガゼやナガウニの場合は、基本的に駆除・廃棄されるため、「肥料」や「餌料」などの有効利用が検討されている。

深浅移植は前述の通りである。深浅移植は、磯焼けの拡大を引き起こす危険性がある。移植先の藻場が磯焼けを起こさないために移植するウニの個体数を考慮するとともに、身入り改善後にはすべて漁獲しなければならない。

除去された身入りの悪いウニを、特定の場所で給餌することにより、身入りを改善させる技術が確立されている。肥育を行う場所や施設として、漁港内に小規模なカゴを設置して行う場合や平磯を粗放的に利用する例がある。肥育用の餌料には、雑海藻や魚肉が利用されている。ただし、魚肉などを与えると、生殖巣が急速に発達する反面、味が悪くなるため、出荷前にコンブなどを与え、生殖巣の味を良くする工夫がされている（水産庁,2015）。

現在、非食用のガンガゼはイシダイ用の釣餌として利用されており、さらに、魚類餌料

として期待される。実際に、ガンガゼを殻ごとローラーにかけてすり潰し、養殖魚用のペレット餌料に添加する試みが行われている。コスト、労力の観点からや必然性に乏しいため実用化には至っていない。

身入りの悪いウニでも、ウニ殻には窒素やリン、マグネシウムなどの植物の生長に必要な栄養素が多く含まれている。ウニ堆肥は、牛ふん堆肥に比べて、窒素、カリウムが少なく、代わりにマグネシウムやミネラル分が多い。また、殻を含むので石灰も多く、透水性、通気性の土壌改良効果が期待できるという（水産庁,2015）。

第2項 (2.2) 現状の問題点

現状の問題点として、やせたウニに商品価値がないため、マーケットの機能が働かず、非効率的な対策が行われていることが挙げられる。漁師にとってやせたウニを駆除するインセンティブは弱く、そのため政府の補助金政策の下でウニの駆除が推し進められている。

食用ウニに関しては肥育の試みが行われている。実際に、北海道などではウニに雑海藻等を与えることでウニの身入りを改善し、出荷も行っている。しかし、当該試みは限定的であり、駆除したウニに対する肥育されたウニの割合は小さい。当該事業は、まずウニを捕獲し、エサとして海藻を与えているため、コストも小さくない。また、深浅移植は磯焼けの拡大を引き起こす危険性がある。移植先でウニが高密度にならないために、移植する個体数を考慮するとともに、身入り改善後にはすべて漁獲することに注意しなければならない。

漁師にやせたウニを捕獲するインセンティブを与えるために、マーケットを導入したい。そこで、磯焼け対策として野菜残渣によるウニ養殖を提言する。詳細は第3節で述べる。

第3節 政策提言

第1項 (3.1) 政策提言概要

これらを踏まえて、本稿では、磯焼け対策として野菜残渣によるウニ養殖を提言する。ウニ養殖の導入によって、漁師に対して自発的な海洋環境保護へのインセンティブを与えるシステムの構築を目指している。つまり、漁師にとって、海の環境保全や収入増につながるだけでなく、獲るだけの漁業から育てる漁業への意識改革になるのではないかと考える。現在は、漁師にとってウニを駆除するインセンティブが低く、政府の補助金政策によって駆除等の様々な対策が行われている。養殖事業により、ウニ駆除対策に払われている政府の補助

金も削減可能になる。

当該政策は、駆除対象のウニと野菜残渣（規格外キャベツ等）の利用によって資源を有効活用することができる。また、磯焼け対策の中心を担う漁業者の後継者不足が深刻化しており、若手漁師主導でウニ養殖を行うという漁業後継者育成事業や副業としての側面を持たせている。

第 2 項 (3.2) 先行研究と本稿の位置づけ

3.2.1 先行研究

ここでは、いくつかの先行研究を紹介する。

吾妻他(1996)は、磯焼け対策としてのウニ駆除の有効性を考察している。過去 40 年以上にわたってサンゴモ平原が持続していた北海道寿都湾の矢追地区と六条地区において、キタムラサキウニとエゾバフウンウニを駆除し、その後の植生を観察した。ウニ除去前では、矢追地区では、底生動物が 16 種、海藻 5 種が、六条地区ではそれぞれ 19 種と 1 種が認められた。ウニ除去後、矢追地区では計海藻 57 種が、六条地区では計 61 種の入植を認めた。ウニを駆除しなかった場所では海藻の生育がほとんど認められず、サンゴモ平原が継続していた。以上より、高密度に生息していたウニの高い摂食圧によってサンゴモ平原が持続していたと結論付けた。

臼井他(2018)は、未利用のムラサキウニの利用法として、農業残渣となるキャベツを餌料として育てることの可能性を考察した。キャベツや野菜などだけで飼育したムラサキウニが 4 年目を迎えるが、特に問題なく成長していることが述べられている。これより、ムラサキウニが通常餌とするような海藻類にウニ類が必要とする特別な栄養成分があるわけではなく、野菜等を摂餌していれば生存できる生き物であると判明した。生殖巣の遊離アミノ酸の組成についても、成熟してからの置換は起こりにくい、生殖巣が極めて未熟な状態からであれば、ある程度与える餌料によってコントロールし、呈味成分を調整できる可能性があるという。実際にキャベツで育てたウニは甘味成分が急激に増加し、苦味成分が激減することが観察され、全体的には甘味が強くて苦味がない味わいが特徴であったと述べられている。

河田(2004)は、害獣の側面を有する北海道のエゾシカの管理にあたり、経済的観点から動学的な最適管理を考察した。エゾシカの資源量動態を表すために、成長関数としてロジスティクス曲線を仮定し、林業経営者の目的関数にエゾシカの捕獲による総収入関数と総費用関数を組み込み、目的関数の最大化条件から分析を行っている。

3.2.2 本稿の独自性

本稿は、前述の3本の先行研究を参考にしているが、食害を引き起こす側面を有するムラサキウニの個体数管理にあたり、現状では未検討である経済学的観点を検討し、さらにウニ養殖という新しい技術を組み込んで動学的な最適管理を考察する点において独自性を有している。

磯焼け対策としてウニの駆除の有効性を考察した研究や水産庁のデータは数多く存在している。しかし、経済学的観点からウニの駆除を分析した研究はほとんどなされていない。また、前述のように、経済学的観点からシカに関する動学的な個体数管理の研究はなされているが、ウニについての同様の研究はほとんどなされていない。なぜなら、従来までは駆除対象のウニを有効活用する方法がなかったためであり、ウニの養殖は2018年に成功し、2019年から試験的に出荷が開始されたからである。

そこで、本稿では、まず、NVP法によってウニ養殖事業のプロジェクト評価を行う。プロジェクト評価を通して、若手漁師に十分なインセンティブを与えるための販売価格と収入の水準についても分析を行う。さらに、ウニの成長関数としてロジスティクス曲線を仮定し、漁師の目的関数を設定し、目的関数の最大化条件からウニの個体数の動学的な最適管理を考察する。

第3項 (3.3) 野菜残渣を利用したムラサキウニ養殖

3.3.1 神奈川県水産技術センターにおけるキャベツによるムラサキウニ養殖

前項で述べたように、神奈川県水産技術センターは、野菜残渣を利用したウニ養殖に継続的に成功している。ここでは、神奈川県水産技術センターの臼井一茂さんへのヒアリング結果を中心として述べていく。

ムラサキウニは、春から初夏の海水温上昇に伴って、生殖巣を肥大化させ、7~8月頃に産卵をする。産卵後、生殖巣は縮小してしまう。私たちはウニの生殖巣を食べており、産卵直前のウニが最も身が入っている。しかし、磯焼け発生地域のウニは餌を食べて尽くしており、まったく生殖巣が肥大化しておらず、商品価値がない。そこで、5月頃に既に育っているムラサキウニを採取し、生殖巣を肥大化させる5~7月の3ヶ月間キャベツを与えて生殖巣を肥大化させることがウニの養殖事業の目的である。

3ヶ月間の週2回の給餌でウニの身入りが10~15%になるまで肥大化させることができたという。食品用として販売するには身入りが最低10%は必要のため、養殖ウニはその水準を超えることができています。

神奈川県水産技術センターでは陸上養殖でウニを飼育しており、ウニの飼育にあたって、

水温、水流、日光に当てない、この3点が重要であるという。飼育を通して、ウニは水温変化に弱く、輸送時の温度変化が致命的になることや、太陽光にも弱いことも分かったという。特に水流に関しては給餌においても重要である。臼井他(2018)は、「キャベツの外葉をそのまま与え飼育を始めたところ、飼育個体全体に餌が行き渡らない状況が観察された。そこで、キャベツを1cm幅の千切りにして水面上に撒き、エアレーションを強くして水流を作ることによって改善した。つまり、水流でキャベツ片が移動しウニの棘に絡まり、それを口まで運んで食べる様子が観察されるようになった」(p.13)と述べている。また、通常ウニは岩などに張り付いて生活する性質であるため、ただ水槽内で飼育するだけでは、水槽の側面や底に張り付くのみで、1つの水槽で大量に飼育できない。そこで表面積を増やす取り組みを行った結果、従来は1つの水槽で200匹前後だったものが600~700匹まで飼育できるようになった。

さらに、神奈川県水産技術センターでは、同じ水槽内で別の生物を飼う試みも開始した。日光があたる場所やウニを飼育していない時期に新たな生物を飼うということである。現在4種を飼育しているという。

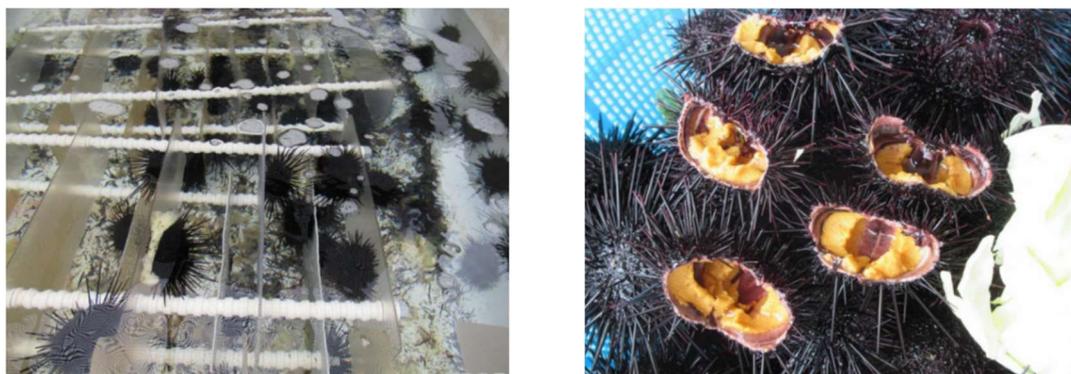


図 3-6 飼育の様子 (左) と身入りの様子 (右)

出典：神奈川県(2018)⁶

3.3.1 小田原市における野菜残渣を利用したムラサキウニ養殖試験事業

小田原市漁業協同組合（神奈川県小田原市）は、2019年から実際にキャベツで育てたウニの出荷を開始した。そこで、実際に小田原市漁業協同組合（以下小田原市漁協）へヒアリングに伺い、その結果を中心として述べていく。

小田原市では、漁業後継者育成事業として野菜残渣を利用したウニ養殖試験事業を開始した。小田原市に限らず日本において沿岸漁業に新規就業するためには、まず地元漁業協同組合に所属することが前提となる。これは、漁業の知識や経験が必要であり、漁船や漁具等

⁶ 神奈川県(2018), 「三浦の野菜残渣を活用したムラサキウニの養殖技術開発～キャベツウニ～」
<<https://www.pref.kanagawa.jp/docs/a2d/cnt/sciencelab/2020suisangijyutu1.html>>,参照日 2021年1月26日

に資金が必要になることから、組合に所属し、一定の見習い期間を経て、組合員として活躍していくからである。従来、組合員の子息や親戚等の家族関係者が漁業に就業する事例が多かった。しかし、近年、生活や仕事に対する価値観の多様化により、漁師の家族関係者が必ずしも漁業に就労するとは限らなくなった。また、現在就業している若手漁師も漁業に対する将来への不安を抱えているという。そこで、小田原市漁協の若手漁師を支援し、定着率を高め、就労意欲と生産性の向上を図るとともに、漁業に関心をもつ若者を新たな担い手として迎え入れ育成していくことを目的とした施策が必要であった。また、小田原市においてもウニ等の植性動物による磯焼けが確認された。そこで、小田原市と小田原市漁協青年部では、神奈川県水産技術センターの研究結果を活用して、漁業後継者育成事業として野菜残渣を利用したウニ養殖試験事業を開始したのである。

2019年の試験的な養殖の実施を通して、多くの課題が認められた。まず、①ウニの身入りが悪く、商品価値が低かったことである。実際ウニを購入した人から厳しいご意見を頂いたという。次に、②飼育環境・管理に多くの手間と時間を要したことである。陸上養殖であったため、海水の給排水や余ったエサ（キャベツ）やフンの処理などが挙げられる。また、飼育期間中に大量斃死も発生した。最後は、③身入りがバラバラであったことである。つまり、エサを多く食べて肥えた個体とそうでない個体がいたということである。

そこで、2020年からは上述の3つの課題を解決するための取り組みを行った。まず、身入りを向上させるために週1回から2回の給餌に変更した。次に、管理が容易な水中養殖を実施した。具体的には、小田原漁港内の海中にかごを設置し、その中でウニを飼育していた。そして、仕切りのあるかごも導入することによって、ウニが容易にエサを捕獲できるようにした。また、新たな取り組みとして、キャベツのほかに小田原市の特産であるミカンも与えることで、小田原としての地域特性を出すことでブランド構築を目指しているという。



図 3-7 小田原市でのウニ養殖の様子 筆者撮影

小田原市漁協の2020年の養殖結果は、ウニの身入りが平均して6~8%にとどまった。商品として十分な身入りとは言えない。2019年から様々な試行錯誤を繰り返してきたが、このような結果になってしまった原因として水中養殖が考えられるという。水中養殖では、給餌のたびに海中からかごを引き揚げている。ウニはストレスに弱く、かごを引き上げる度にトゲが折れていた可能性があるという。また、生殖巣の肥大ではなくトゲの回復にエネルギーが使われていたのではという見解であった。

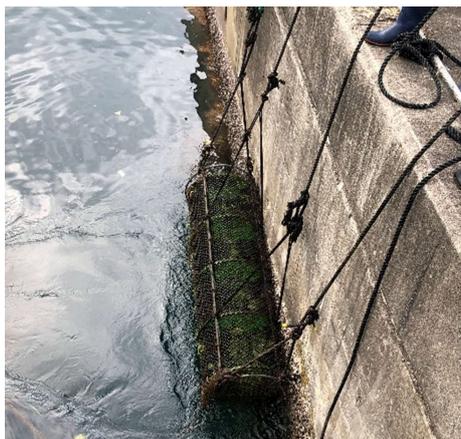


図 3-8 水中につるしたかごを引き上げる様子 筆者撮影

第4項 (3.4) 政策の可能性と問題点

エサ代という問題点はクリアしている。ウニは自然界ではコンブを食べているが、コンブは高価であり、キャベツだけでウニの養殖に成功している。キャベツ以外の野菜でウニ養殖に成功すれば、地域の野菜を活かすことで地域活性に繋げることができるのではないかと考える。神奈川県水産技術センターでキャベツを使用した理由は、キャベツが三浦の特産であったためであり、小田原市ではキャベツとともに特産のミカンも与える試みを開始した。実際に、神奈川県はキャベツで育ったウニのブランド構築のために「キャベツウニ」を商標登録した。

政策の問題点の1つ目として、神奈川県水産技術センターのみが食用の水準に達したウニの養殖に成功していることが挙げられる。例えば、前述したように、ヒアリング先の小田原市では、生殖巣の肥大化は認められたが、身入りが6~8%にとどまった。また、水中養殖は管理が容易というメリットがあるが、小田原市の結果や神奈川県水産技術センターでは陸上養殖で成功している点を考慮すると、ウニ養殖には陸上養殖が最適であると考えられる。このように、他で成功できていない理由として、臼井さんは「養殖技術の問題というよりは、そもそも生き物を飼っていない。餌をやるだけで手一杯で、ウニの状態を十分にチェックできていないのではないかと指摘している。さらに、臼井他(2019)は、「ムラサキウニの採取場所によっては生殖巣が極めて少ないことと、さらに生殖巣の色彩がチョコレート

ト色から墨色のような褐色であるものも多かった。それらは最後まで身入りが悪く、さらに苦み強い」(p.48)と述べている。日本全国の事例を見る限り、養殖技術が確立したとはまだ言えないのが現状である。

政策の問題点の 2 つ目は、ウニの養殖事業が大規模化し、メイン事業として位置付けできるかは今後の技術発展次第であり、現時点では不明である点である。ウニ養殖の大規模化に関しては、神奈川県水産技術センターが取り組んでいる。

そこで、本稿では小田原市が掲げていたように、漁業後継者育成事業や副業としてウニ養殖事業を位置付ける。漁業後継者育成事業や副業としてのウニ養殖の導入によって、漁師に対して自発的な海洋環境保護へのインセンティブを与えるシステムの構築を目指している。つまり、現在の獲るだけの漁業システムに、ウニの養殖事業を組み込むことができれば、獲るだけでなく育てるといった漁業システムが構築できると考える。

第 4 節 モデル分析

第 1 項 (4.1) NVP 法によるプロジェクト分析

4.1.1 NVP 法による分析を行うにあたって

前節で述べたように、神奈川県水産技術センターでは野菜残渣を利用したウニ養殖は成功しており、小田原市では 2019 年から実際に出荷が始まっている。しかし、神奈川県水産技術センターのみが継続的な養殖に成功しており、全国的に完全な養殖技術が確立されたわけではなく、また小田原市等の出荷規模も小さい。

そこで、この節では、今後養殖技術が確立した場合を想定してコスト分析を行う。具体的には、ヒアリング結果をもとにしたコスト分析によって、利潤を出すための水準や若手育成事業としてのウニ養殖の可不可を明らかにしていく。

分析に当たっての前提条件として、神奈川県水産技術センターの養殖方法をベンチマークとする。具体的には、2,000 匹ウニにキャベツを与えて 3 ヶ月間 (5~7 月) 陸上養殖し、また、同水槽での他の生き物の養殖は考慮しない。

4.1.2 各種コスト算出

費用が掛かるものは、エサ代、設備投資費 (水槽、ポンプ)、ウニの捕獲・養殖に係る人

件費、設備稼働費用（電気代）の4項目である。ただし、本分析において海水にコストは掛からないとする。漁港内等の沿岸部での養殖を想定しているため、ポンプで海水を汲めばよいからである。

まず、エサ代についてである。週2回の給餌の場合、ウニ1匹当たり3ヶ月でキャベツ1玉食べる。ここでは、1玉20円の規格外キャベツとする。

$$20 \times 2,000 = 40,000 \quad (1)$$

次に設備投資費（水槽、ポンプ）である。水槽は3t水槽(3m×1m×1m)とする。1つの水槽で約600~700匹のウニが飼育可能なため、水槽は3つあればよい。また、ポンプに関しては、3t水槽に約1tの水を入れており、1日2回水を入れ替えるため、12時間で3槽分の1.5tの給排水ができるものを想定する。株式会社カイスイマレンの角型水槽MK3000がこの条件を満たしており、また株式会社川本の海水用自吸式プラスチックポンプがこれに該当した。価格は株式会社大谷錦鯉店のオンラインショップのものを参考にし、それぞれ、769,521円と134,244円であった。

$$(769,521 \times 3 + 134,244) = 2,442,807 \quad (2)$$

人件費は養殖と捕獲に係るものとして2つに分けられる。本稿では若手育成事業としてのウニ養殖という点でも分析を行うため、これら2つの人件費は養殖事業による給与支払総額として x とおく。また、小田原市へのヒアリングより、ウニ採取のために船や機材の依頼をする。依頼料は約25,000円とし、人件費として計上することとした。

$$x + 25,000, x > 0 \quad (3)$$

最後に設備稼働費（電気代）である。電気代は、電力(kW)に稼働時間(h)と電気料金単価(円/kWh)を乗じて概算する。当該ポンプは0.4kWであり、5~7月の92日間稼働させる。また、電気料金単価は30円/kWhとした。

$$0.4 \times 92 \times 24 \times 30 = 26,496 \quad (4)$$

4.1.3 NPV 算出とシミュレーション

割引現在価値法（NPV法）により当該ウニ養殖プロジェクトを評価する。割引率は3%とし、税金は考慮しない。また、耐用年数は水産養殖業設備が5年であったため（国税庁）、5年とした。

初期投資額は、(2)式より2,442,807円、キャッシュ・アウト・フローは、(1)、(3)、(4)式を合計した

$$40,000 + (x + 25,000) + 26,496 = x + 91,496 \quad (5)$$

である。

ウニの1匹あたりの販売価格（卸売価格）を p と設定し、ヒアリングで判明した飼育したウニの2割は死滅する点を考慮し、キャッシュ・イン・フローは、

$$p \times 2,000 \times 0.8 = 1600p, p > 0 \quad (6)$$

となった。

割引率 3%における 5 年の現価係数 4.580 を用いて、(2),(5),(6)式より NPV を算出すると、

$$-2,442,807 + \{1600p - (x + 91,496)\} \times 4.580 \approx 7,328p - 2,861,859 - 4.58x \quad (7)$$

となった。

ここで、小田原市のヒアリング結果をもとに $p = 350$ とすると、NPV は、

$$-2,442,807 + \{1600 \times 350 - (x + 91,496)\} \times 4.580 \approx -297,059 - 4.58x \quad (8)$$

となった。 $x > 0$ より、 $NPV < 0$ となり、当該養殖プロジェクトは棄却される。

キャッシュ・イン・フローが小さいため、当該プロジェクトは棄却された。これは、販売価格（卸売価格）がプロジェクトを採用するための水準に達していなかったことを意味する。販売価格 350 円は小田原市のヒアリング結果をもとにしたが、ウニの身入り率が 10%以下と悪かったためにこの金額に設定したとお聞きした。ウニが商品としての十分な水準を満たしておらず、採算がとれないというヒアリング結果とも本プロジェクト評価は一致した。

そこで、初めに若手漁師育成事業としてウニ養殖が実現される p と x の関係を導出する。

(7)式を p と x の一次関数の形に変形すると、以下のようになる。

$$p = \frac{2,861,859}{7,328} + \frac{229}{366,400}x, p > 0, x > 0 \quad (9)$$

ここで、給与支払総額 x の最低金額を算出する。 x は、最低賃金にウニの採取と養殖に掛かる労働時間を乗じて算出する。厚生労働省より、2020 年における全国の最低賃金の加重平均は 902 円であった。秋野(2016)によると、タモ除去による 1 時間当たりのウニ除去数は平均 702 個/人/h、潜水者による 1 時間当たりのウニ除去数は、平均 540 個/人/h であった。駆除と採取では厳密には方法が異なるため、ここでは 2000 匹のウニを 4 時間で採取すると仮定する。日々の給餌では、1 つの水槽あたり 10~15 分ほどかかる。3 ヶ月の間、3 つの水槽に週 2 回の給餌を行うため、3 ヶ月を 14 週とすると、給餌に掛かる総時間は

$$3 \times \frac{1}{4} \times 2 \times 14 = 21 \quad (10)$$

となる。この他に、餌であるキャベツの搬入や出荷作業に掛かる時間等があるが、ここでは 20 時間とする。

以上より、給与支払総額 x の最低金額は、

$$902 \times (4 + 21 + 20) = 40,590 \quad (11)$$

であり、

$$x \geq 40,590 \quad (12)$$

となる。

(9)、(12)式より、 p と x の一次関数は、

$$p = \frac{2,861,859}{7,328} + \frac{229}{366,400}x, p > 0, x \geq 40,590 \quad (13)$$

となる。 $x = 40,590$ のとき、

$$p = 415.90 \dots \approx 416 \quad (14)$$

となる。

ここで、実際のウニの卸売価格をしてみる（表 4-9）。2020 年 6~8 月の平均卸売価格は 14,026 円/kg であった。水産庁(2013)によると、ブリやマタイでは 1 年の中で養殖魚の価格が天然魚のものを上回る月も存在している。ここでは、養殖ウニの価格は天然ウニの 7 割とし、ウニ 1 匹あたり 90g とすると（臼井他,2018,p.11）、養殖ウニの卸売価格は、

$$p = 14,026 \times 0.7 \times \frac{90}{1,000} \approx 884 \quad (15)$$

となる。このとき、 x は、

$$x \approx 789,539 \quad (16)$$

となる。つまり、当該価格でウニを売れる場合、若手漁師への最大給与支払総額は約 79 万円ということになる。

表 4-9 国産ウニの卸売価格

	単位 (kg・円)					
	2020年5月	2020年6月	2020年7月	2020年8月	2020年9月	2020年10月
数量	47,528	62,228	60,818	65,824	37,306	30,592
金額	543,142,192	764,638,359	854,572,335	1,029,966,525	879,229,408	649,448,972
平均価格	11,428	12,288	14,051	15,647	23,568	21,229

東京都中央卸売市場日報（市場統計情報）をもとに筆者作成

下記のグラフ（図 4-10）は、 p と x の関係を表したものである。

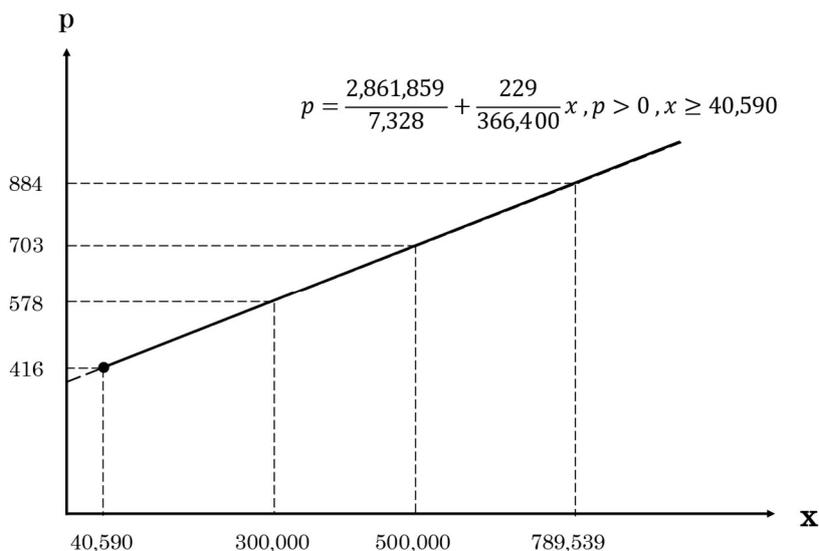


図 4-10 卸売価格 p と給与支払総額 x の関係

ここで、養殖事業従事人数を n 人とした。つまり、1人あたりの給与支払額は $\frac{x}{n}$ となり、 $\frac{x}{n} = m$ とおく。ヒアリングより、2人でウニの餌やり等を行っているため、

$$n \geq 2 \quad (17)$$

とする。(9)式より、 x を p で表すと、

$$x = \frac{366,400}{229}p - \frac{143,092,950}{229} \quad (18)$$

となる。これより、 m は以下のように表せる。

$$m = \frac{x}{n} = \frac{366,400p - 143,092,950}{229n} \quad (19)$$

(19)式より、 m と n は反比例の関係である。例えば、 $p = 884$ のとき、 $n = 2$ の場合の1人あたりの給与は約40万円、 $n = 4$ であれば約20万円となる。ヒアリング結果より、今後は $n = 2$ 、つまり2,000匹のウニを2人で世話をするものとして議論する。

4.1.4 プロジェクト評価

上述の各種シミュレーションより、 $NPV = 0$ となる p 、 x 、 m の水準を算出した。養殖技術が確立しているという条件下では、十分な水準の p のもとでは($p > 416$)、 $NVP > 0$ となるため、プロジェクトは実行されると考えられる。ただし、変数 p 、 x 、 n の変動によって、1人あたり給与支払額 m が変動する。1人あたり給与支払額 m は、若手漁師にウニの駆除・養殖を行うためのインセンティブを与える重要な要素である。 m の大きさによって、若手漁師に十分なインセンティブを与えられるかが決定するため、 m が低い水準の場合には、 $NPV > 0$ であっても養殖プロジェクトが実行されない可能性がある。下記の表4-11をみると、沿岸漁家の平均漁労所得は概ね200~300万円の範囲内である。本シミュレーション結果に基づく、ウニ養殖によって1人あたり最大で約40万円の収入を得られ、沿岸漁家の平均漁労所得と比較して約10~20%の所得増加が見込める。

今後、同水槽内での他生物の飼育技術が確立すれば、より投資の回収が容易になるとともに収入も増加するため、インセンティブの強度も増すと考えられる。

表 4-11 沿岸漁家の漁労所得

単位：万円

	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
沿岸漁業平均	254	351	338	348	273	216
沿岸漁船漁家	199	261	235	219	186	169
海面養殖漁家	541	821	1,004	1,166	763	491

水産庁のデータ⁷をもとに筆者作成

⁷ 水産庁(2018)、「漁業経営に関する統計 沿岸漁家の漁労所得」
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/20.html>,参照日 2021年1月22日。

第2項 (4.2) ロジスティック関数とウニの個体数管理

4.2.1 ロジスティクス曲線

ウニの資源量動態を表すために、成長関数としてロジスティクス曲線を仮定する。

$$\Delta S = S_t - S_{t-1} (\equiv g(S_t)) = rS_t \left(1 - \frac{S_t}{K}\right) \quad (20)$$

S_t はウニの資源量であり、 t は時間（年単位）を表す。 $g(S_t)$ 、 r 、 K はそれぞれウニの自然成長率、自己増殖率、環境容量である。ウニの採取量を z とすると、ウニは以下のように増加していくことになる。

$$\Delta S = g(S) - z \quad (21)$$

ここで、 $g(S) = z = rS \left(1 - \frac{S}{K}\right)$ であれば、ウニの資源量は変化せず、このような採取量を持続可能生産量と呼ぶ。

採取費用は採取努力 E と資源量 S に依存するため、採取量 z は以下の関数として表せる。

$$z = H(E, S), \frac{\partial z}{\partial E} > 0, \frac{\partial z}{\partial S} > 0 \quad (22)$$

H は、下記のように決定されると想定する。

$$H(E, S) = hES, h > 0 \quad (23)$$

(22)式より、持続可能生産量は以下のように表せる。

$$g(S) = H(E, S) \quad (24)$$

任意の E に対して、その資源量を持続可能とする S が存在する。その水準を $S(E)$ とする。 $S(E)$ は、(24)式を満たしている。(20)、(23)、(24)式より、均衡点では、

$$S(E) = K \left(1 - \frac{hE}{r}\right), E < \frac{r}{h} \quad (25)$$

となる。これより、

$$g(S(E)) = hKE \left(1 - \frac{hE}{r}\right) \quad (26)$$

となる。

4.2.2 漁師の目的関数と最大化条件

次にウニ養殖が実現していない場合と実現された場合の漁師の目的関数をそれぞれ定義する。

ウニ養殖が実行されていない場合、漁師の収入関数は以下のように定義できる。

$$TR_n = R(S(E)) + qg(S(E)), \frac{\partial R}{\partial S} < 0, q > 0 \quad (27)$$

$R(S)$ は本業からの収入であり、ウニの資源量 $S(E)$ に依存する関数として定義される。 q は、政府の補助金から支払われる 1 単位のウニを駆除したことに対する報酬である。同様に費用関数は、

$$TC_n = \bar{c} + wE + \bar{v} \quad (28)$$

となる。 \bar{c} 、 w 、 \bar{v} はそれぞれ、本業からの費用、個体数あたりの採取費用、ウニ養殖実用化に向けた試験費である。 c と v は所与とする。以上より、ウニ養殖が実行されていない場合の漁師の利潤（目的関数）は、

$$\pi_n(E) = TR_n - TC_n = R(S(E)) + qg(S(E)) - \bar{c} - wE - \bar{v} \quad (29)$$

となる。ここで、モデルを単純化するために、 $R(S)$ を所与とする。

$$\pi_n(E) = TR_n - TC_n = \bar{R} + qg(S(E)) - \bar{c} - wE - \bar{v} \quad (30)$$

よって、(26)、(30)式より、目的関数 $\pi_n(E)$ を最大化する E_n^* は、

$$E_n^* = \frac{r}{2h} \left(1 - \frac{w}{qhK} \right) \quad (31)$$

となる。

ウニ養殖が実行された場合、漁師の収入関数は以下のように定義できる。

$$TR_f = R(S(E)) + p\theta g(S(E)), p > 0, 0 < \theta \leq 1 \quad (32)$$

p はウニの価格、 θ は採取したウニに対する養殖されたウニの割合である。例えば、採取（駆除）されたすべてのウニが養殖された場合、 $\theta = 1$ となり、6割が養殖された場合、 $\theta = 0.6$ となる。ウニ養殖を行う場合には、ウニ駆除に対する報酬は受け取らないとする。ウニ養殖の費用関数 C_f は、採取量 $H(E, S)$ に依存する関数として

$$C_f = F(H(E, S)) \quad (33)$$

と定義できる。養殖費用関数が、以下のように決定されると想定する。ただし、 f は、 p より小さいとする($p > f$)。

$$F(H(E, S)) = fH(E, S) = fhES, f > 0 \quad (34)$$

ウニ養殖が実行された場合、漁師の費用関数は以下のように定義できる。

$$TC_f = \bar{c} + wE + fhES \quad (35)$$

以上より、ウニ養殖が実行された場合の漁師の利潤（目的関数）は、

$$\pi_f(E) = TR_f - TC_f = R(S(E)) + p\theta g(S(E)) - \bar{c} - wE - fhES, p > f \quad (36)$$

同様に、モデルを単純化するために、 $R(S)$ を所与とする。よって、目的関数 $\pi_f(E)$ を最大化する E_f^* は、

$$E_f^* = \frac{r}{2h} \left(1 - \frac{w}{\theta(p-f)hK} \right) \quad (37)$$

となる。

ウニの自然成長率 $g(S(E))$ と採取努力 E の関係を以下のグラフで表した（図 4-12）。

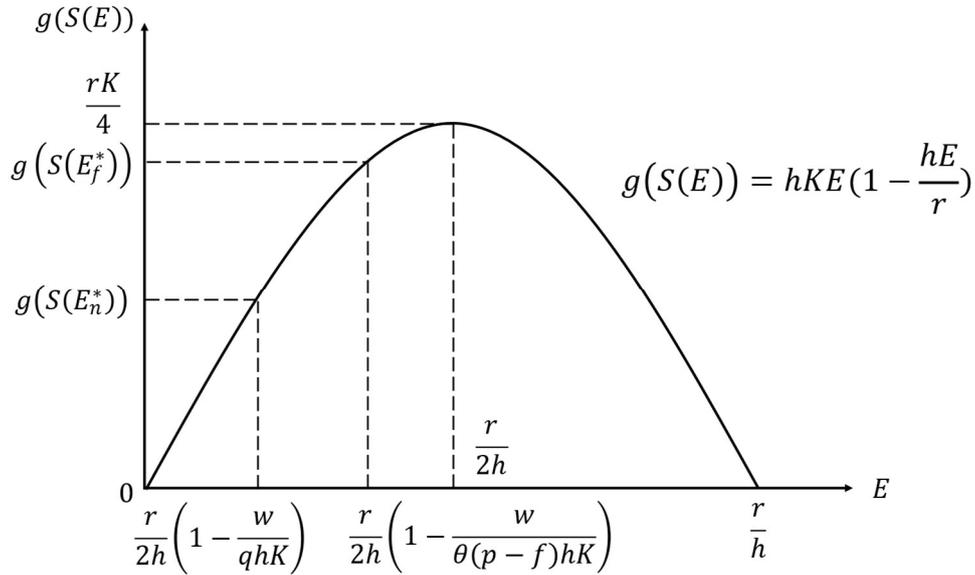


図 4-12 ウニの自然成長率 $g(S(E))$ と採取努力 E の関係

ここからは、採取努力 E_f^* とパラメーター θ 、 p 、 f との関係について、それぞれ見ていく。まず、 E_f^* と θ の関係であるが、下記のようなになる。

$$\frac{dE_f^*}{d\theta} = \frac{rw}{2h^2\theta^2(p-f)K} > 0, \because p > f \quad (38)$$

$$\frac{d^2E_f^*}{d\theta^2} = -\frac{rw}{h^2\theta^3(p-f)K} < 0, \because p > f \quad (39)$$

同様に、 E_f^* と p 、 E_f^* と f の関係について、それぞれ 1 階微分、2 階微分すると、以下のように表せる。

$$\frac{dE_f^*}{dp} = \frac{rw}{2h^2\theta(p-f)^2K} > 0, \because p > f \quad (40)$$

$$\frac{d^2E_f^*}{dp^2} = -\frac{rw}{h^2\theta(p-f)^3K} < 0, \because p > f \quad (41)$$

$$\frac{dE_f^*}{df} = -\frac{rw}{2h^2\theta(p-f)^2K} < 0, \because p > f \quad (42)$$

$$\frac{d^2E_f^*}{df^2} = -\frac{rw}{h^2\theta(p-f)^3K} < 0, \because p > f \quad (43)$$

θ が増加すれば、 E_f^* も増加することが分かる (図 4-13)。しかし、 θ の増加に伴って、 E_f^* の増加率は逓減していく。つまり、ウニ養殖の大規模化が実現されたなどの技術進歩によって、より多くのウニを養殖することが可能になることで θ が上昇することで、より多くのウニを捕獲するために採取努力 E_f^* が増加するのである。

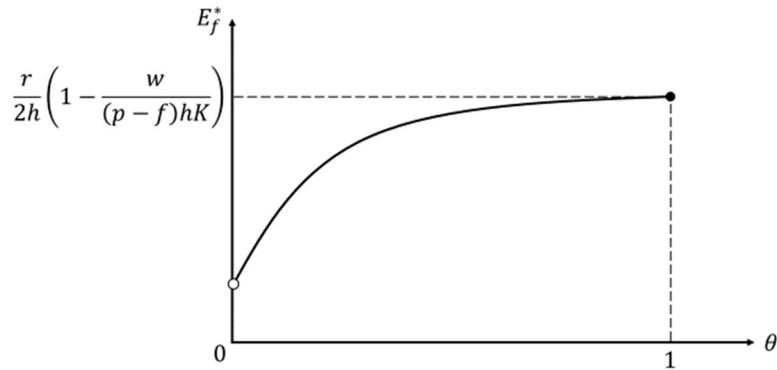


図 4-13 E_f^* と θ の関係

同様に、 p が増加すれば、 E_f^* も増加し、 p の増加に伴って、 E_f^* の増加率は逡減していく（図 4-14 左）。これは、ウニの価格 p が高くなることによって、より多くのウニを捕獲・養殖するために採取努力 E_f^* が増加するためである。一方で、 f が増加すれば、 E_f^* は減少することが分かる。さらに、 f の増加に伴って、 E_f^* の減少率は逡増していく（図 4-14 右）。ウニの養殖費用 f が高くなることによって、ウニを捕獲・養殖するインセンティブが失われるため、採取努力 E_f^* が減少するのである。

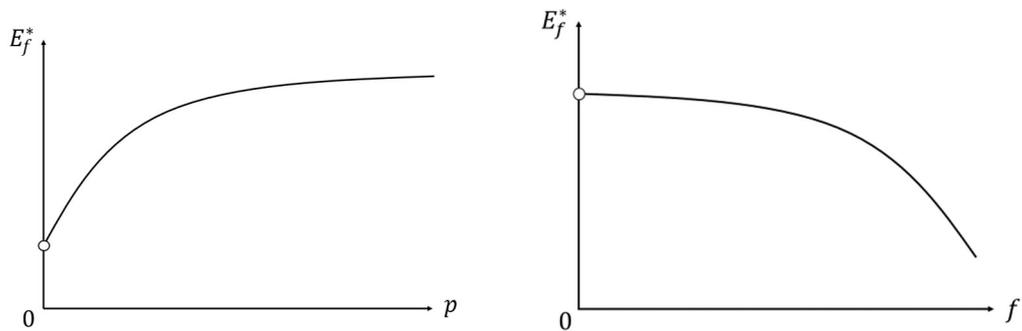


図 4-14 E_f^* と p の関係（左）と E_f^* と f の関係（右）

4.2.3 ウニの個体数管理のシミュレーション

(1) $\theta = 1$ のとき

ここでは、各パラメーターを設定し、時間(t)の経過によって、どのようにウニの個体数 S_t が変化するかを分析する。さらに、ウニ養殖が実行された場合とそうでない場合でのウニの個体数 S_t の変動の差異についても分析する。

磯焼けが発生している場所では、ウニが高密度で生息し、かつ、餌がないにもかかわらず生存している。このような状況は、ウニの個体数 S_t が環境容量 K に迫っていると捉えることができる。よって、 $S_0 = 0.9K$ とし、 $K = 300,000$ 、 $S_0 = 270,000$ とした。内的増殖率 r につ

いて、現状では確実な値が得られないため、0.1、0.5、1の3パターンでシミュレーションを行うこととした。モデルを単純化するために、 h と θ は1に基準化した。

p は前項より、 $p = 884$ とする。1単位のウニを捕獲することの費用は、

$$wE \div hES = \frac{w}{hS} \quad (44)$$

となる。秋野(2016)より、500匹/人/hとし、厚生労働省より、2020年における全国の最低賃金の加重平均は902円であるため、(44)式より、 w は、

$$\frac{w}{hS} = \frac{902}{500} \Leftrightarrow w = 1.804hS_0 = 487,080 \quad (45)$$

となる。1単位のウニの駆除に対する報酬 q は、1単位のウニを捕獲することの費用 $\frac{w}{hS}$ の1.5倍とし、 $q = 2.7$ と想定した。養殖費用関数 C_f は線形と想定しており、(2)、(5)式より、1単位のウニを養殖するための費用 f は、

$$f = \frac{(2,442,807/5) + 91,496}{2,000} \approx 290 \quad (46)$$

とする。分子に関して、初期投資額から減価償却費を算出し、その他の費用と合算した。給与支払総額 x は収益という側面もあるため、ここでは費用としては考慮しない。

上記パラメーターの設定に基づき、内的増殖率 $r = 0.1, 0.5, 1$ の3パターンについてウニの個体数変動は以下ようになった(図4-15)。ウニ養殖が実行されていない場合の利潤に関して、複数の定数項があるため、グラフ内で表さなかった。

内的増殖率 r が高い場合には、ウニは急激に個体数を減らす、一方で、 r が低い場合には、緩やかに個体数が減少していくことが見て取れる。内的増殖率 r に関わらず、養殖が実行された場合はウニの個体数 S は約15万匹に収束し、養殖が実行されない場合にはウニの個体数 S は約24万匹に収束した。ウニ養殖の有無によって、ウニの個体数 S に大きな違いが出た。養殖がある場合には、ウニの個体数が27万匹から約45%減少して15万匹に収束したのに対し、養殖がない場合には、約12%の減少にとどまった。

本モデルでは、持続可能生産量 $g(S) = z = rS_t(1 - S_t/K)$ を仮定しているため、内的増殖率 r によって利潤 $\pi_f(E)$ が変動する。つまり、 r が高い場合には、ウニの増加率が高く、それだけ多くのウニを捕獲して養殖するため利潤が高くなるのである。

ウニ養殖が実行されていない場合、漁師が得ることができるウニ駆除に対する報酬は少額である。政府の補助金政策の下では、漁師にとってウニの駆除を行うインセンティブは低く、ウニの個体数を十分に管理できているとは言えない。養殖の実施によって、ウニを捕獲・養殖し、収入を増加させるというインセンティブを漁師に与える。以上より、ウニ養殖がウニの個体数管理に一定の効果を発揮することができると思われる。

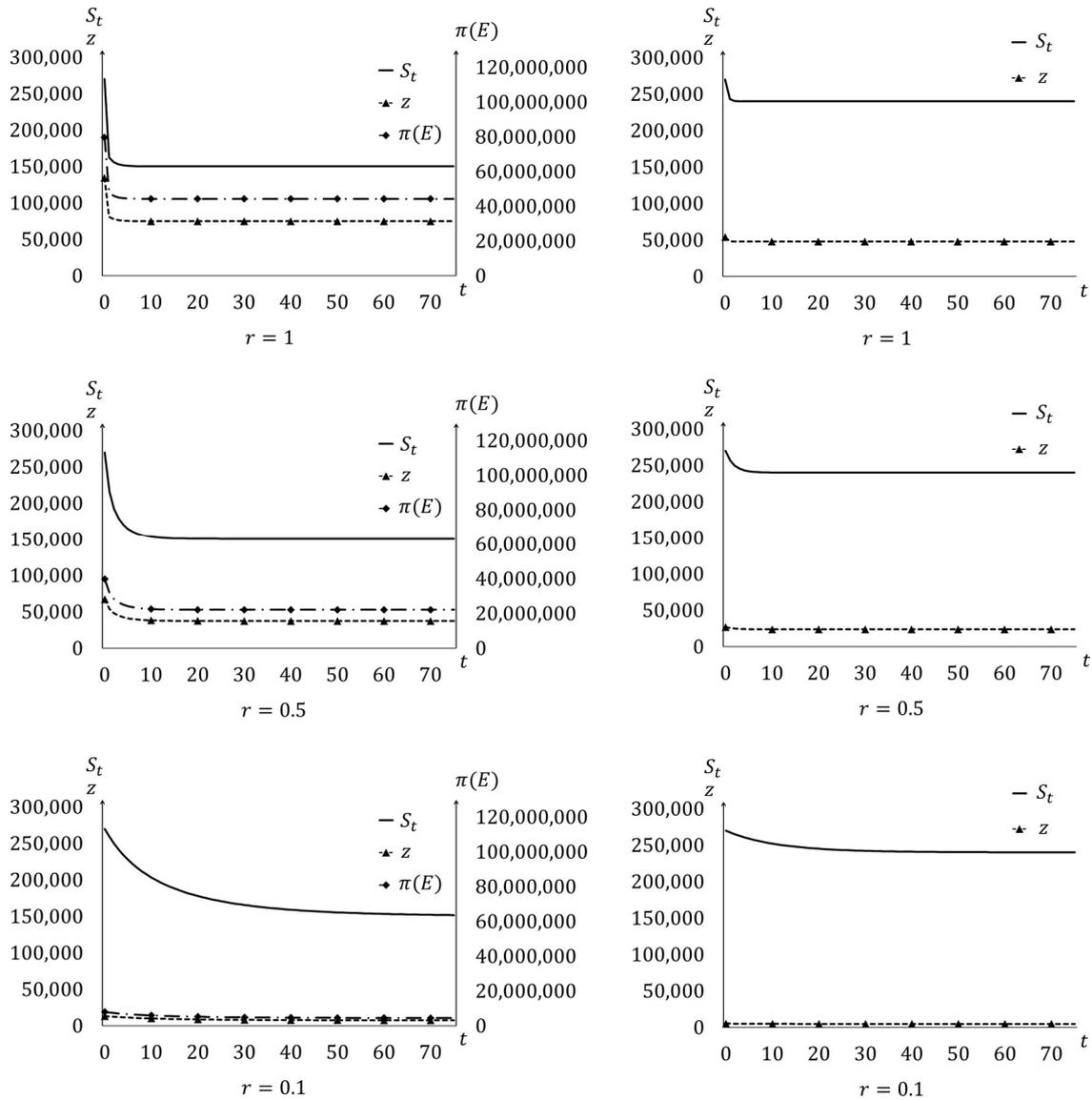


図 4-15 ウニの個体数変動 (左：養殖あり、右：養殖なし)

(2) その他のシミュレーション

まず、 $\theta = 1$ 以外の場合を見ていく。結果は下記の通りである (図 4-16)。

図 4-16 は、 θ の変動がウニの個体数に大きな変化を生むわけではないことを示している。

図 4-15 と図 4-16 を比較すると、ウニの個体数は両者とも 15 万匹前後で収束している。しかし、両者で利潤には大きな差が出ている。 $\theta = 1$ では、利潤は 4,400 万円で収束したのに対して、 $\theta = 0.1$ ではその 10 分の 1 である 420 万円で収束した。よって、ウニ養殖の大規模化に関するパラメーター θ は、ウニの個体数管理には影響しないが、漁師の利潤には大きく影響するのである。

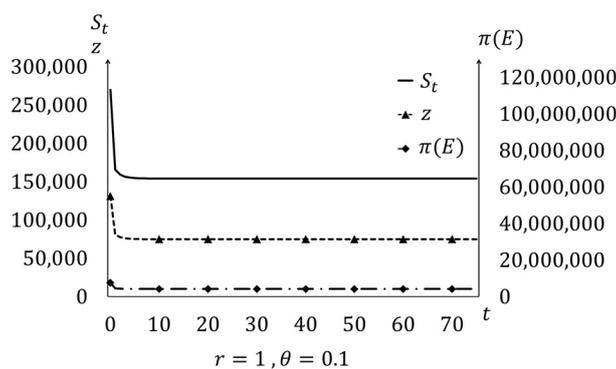
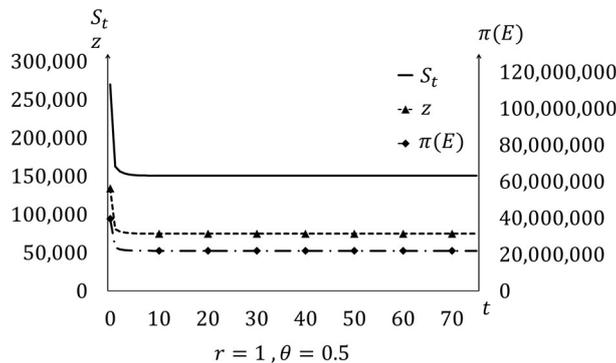


図 4-16 θ の変化に伴うとウニの個体数変動

Karen & Robert(2014)は、藻場として安定している状態とウニ焼けで安定する状態でのウニの密度の差は 10 倍前後であると述べている。前述の分析より、漁師は自身の目的関数を最大化するように行動し、その条件のもとではウニの個体数は約半減するにとどまった。そこで、ウニの個体数を 10 分の 1 (30,000 匹前後) にする水準について分析を行う。

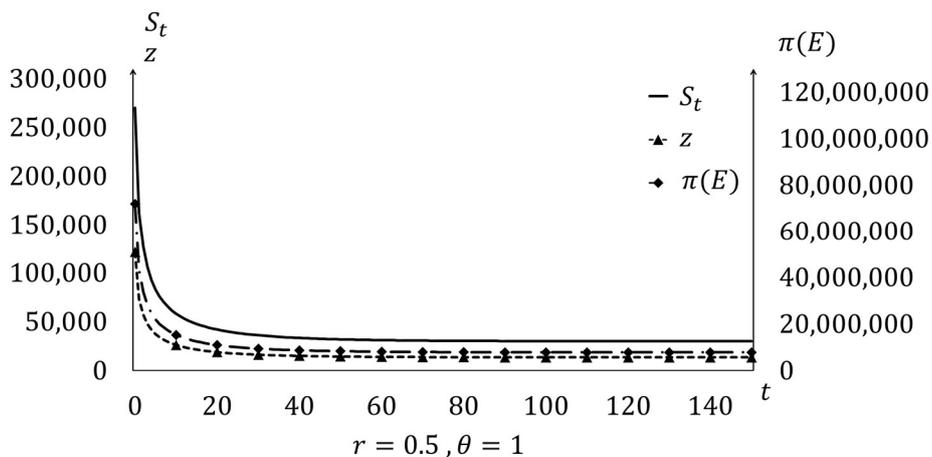


図 4-17 $E = 0.45$ におけるウニの個体数変化

ウニの個体数を約 3,000 匹で収束させるためには、 $E = 0.45$ である必要があった。このときの E を、 E_s とする。

ここで、生物個体群を絶滅させることを想定する。毎期増殖を超える捕獲を行えばよいわけであり、 $\bar{E} = \frac{r}{h}$ を想定する。

$$rS \left(1 - \frac{S}{K}\right) < rS = hES \Leftrightarrow E = \frac{r}{h} \quad (47)$$

また、持続可能生産量が最大となる資源量を S_{msy} とし、 $S(E) = S_{msy}$ となる E は、(26)式より、 $E_{msy} = \frac{r}{2h}$ である。

E_s は以下のように表せる。

$$E_n^* < E_f^* < E_{msy} = 0.25 < E_s < \bar{E} = 0.5 \quad (48)$$

ウニ養殖の導入後、このような採取努力水準 E_s が達成される場合には、ウニによって磯焼けが発生している区域では、藻場の回復が確認できると考えられる。しかし、当該努力水準は費用の面が一切考慮されていない。図 4-17 を見ると、当該努力水準でウニを捕獲・養殖した場合、 E_f^* のときと比較して利潤が減少している。

以上より、ウニ養殖の導入だけでは、藻場の回復は見込めず、海藻のタネ播きを併せて行う等の複合的な磯焼け対策の実施・継続が必要であると考えられる。

第 5 節 結論

日本各地でウニによる磯焼けが拡大しており、本稿では、ウニによる磯焼け対策として野菜残渣によるウニ養殖の導入を提言した。

従来、漁師にとって、身入りが悪く、商品価値のないウニを駆除するインセンティブは低く、政府が補助金を支払うことでウニの駆除が進められていた。ウニに商品価値がないため、市場は存在せず、ウニの個体数を十分に管理できているとは言えなかった。

そこで、本稿は、ウニ養殖の導入によって、漁師に対して自発的な海洋環境保護へのインセンティブを与えるシステムを構築し、ウニの個体数管理を目指すことを提言した。ウニ養殖が実現されていない場合、漁師が得ることができるウニ駆除に対する報酬は少額である。そこで、養殖の実現によって、ウニを養殖し、収入を増加させることが可能になり、漁師にウニを捕獲するというインセンティブを与える。また、駆除対象のウニと野菜残渣（規格外キャベツ等）の利用によって資源を有効活用することができる。さらに、磯焼け対策の中心を担う漁業者の後継者不足が深刻化しており、ウニ養殖事業には、若手漁師主導という漁業後継者育成事業や副業としての側面を持たせる。

分析結果より、ウニ養殖がウニの個体数管理に一定の効果を発揮することができると結

論付けた。本稿のモデル分析では、養殖導入によって、ウニの個体数は半減した。しかし、市場において、養殖だけではウニを目標個体数まで減らすことができないことも明らかになった。以上より、ウニ養殖だけでなく、海藻の生産力を回復させる対策や成長の阻害要因を取り除く対策等と組み合わせて行うことが必要である。

専門家によると、養殖によるウニの個体数管理で最も障壁となることは、ウニの養殖技術の確立ではなく、ウニの捕獲・移送であるという。神奈川県水産技術センターを中心として野菜残渣によるウニ養殖の技術は確立されつつある。しかし、どれだけ養殖技術が高度化しても、海中からウニを捕獲する必要があることは変わらない。ウニを海中で駆除することと捕獲して移送することには大きな差が存在し、後者には多くの時間と労力が掛かってしまう。現状のウニ養殖は、ウニの産卵シーズン前の5~7月の3ヶ月間という短い期間で行うことが想定されている。そのため、短期間で大量のウニを捕獲する必要があり、ウニ養殖が大規模化するにつれて、それは顕著となる。長期的にウニ養殖を行うためにはウニの捕獲・移送の効率化が課題になると言及していた。

最後に、本稿における議論の今後の発展の方向性について論じたい。まず、モデルの期間についてである。本稿では、モデルの期間を設定しなかった。しかし、現実では養殖が実現していない（養殖が研究されている）期間、養殖が確立 ϕ で成功する期間、養殖が完全に確立した期間というように養殖の段階に応じて3つの期間に分けることができる。そこで、今後の研究では、期間を拡張し、最終的には無限期間で分析を行うことが必要となるであろう。次に、我々が設定したモデルについてである。今回の分析では現状に即した数値を設定したが、分析の明瞭化のためにモデルを簡略化し、詳細なデータは組み込んでいない。そのため、誤差が発生していることも事実である。したがって、今後の研究では、モデルの変数やパラメーターの設定などをより詳細に分析・検討する必要があるだろう。

たしかに、上述のように検討の余地は残されているが、本稿で述べてきた通り、野菜残渣を利用したウニ養殖の必要性は明白である。全国的に実用化の段階にまで運ぶことが出来れば、今後の日本の水産業、特に養殖業の発展に寄与するものと期待できる。

参考文献

- Karen, F., & Robert, S.E. (2014). Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 495, 1-25.
- 秋野秀樹(2016),「北海道日本海における磯焼け転石帯でのウニ除去効率の算定」,『2016年度日本水産工学会学術講演会講演論文集』,p.25-26,日本水産工学会.
- 吾妻行雄,川井唯史,中多章文,西川信良,松山恵二(1996),「北海道 日本海沿岸のサンゴモ平原におけるウニ除去後の海藻群落の遷移」,『日本水産学会誌』63(5),p.672-680,日本水産学会.
- 伊藤慶明,高橋正征,深見公雄編(2006)「海洋深層水の多面的利用 ー養殖・環境修復・食品利用」, 恒星社厚生閣,p.79-90
- 白井一茂,田村怜子,原日出夫(2018),「野菜残渣を餌としたムラサキウニ養殖について」,『神奈川県水産技術センター研究報告』9,p.9-15,神奈川県水産技術センター.
- 白井一茂,加藤健太,田村怜子,原日出夫(2019),「野菜などを飼料としたムラサキウニ飼育における生殖巣の発達と呈味成分の変化」,『神奈川県水産技術センター研究報告』10,p.43-49,神奈川県水産技術センター.
- 神奈川県(2018),「三浦の野菜残渣を活用したムラサキウニの養殖技術開発～キャベツウニ～」,<<https://www.pref.kanagawa.jp/docs/a2d/cnt/sciencelab/2020suisangijyutu1.html>>,参照日 2021年1月26日
- 株式会社大谷錦鯉店(2021),「川本 海水用 自吸式プラスチックポンプ GSP3-406-C0.4T 三相 200V 60Hz」,<https://www.nishikigoiten.com/shop/products/detail.php?product_id=10134>,参照日 2021年1月8日.
- 株式会社大谷錦鯉店(2021),「カイスイマレン 角型水槽 MK3000」,<https://www.nishikigoiten.com/shop/products/detail.php?product_id=4421>,参照日2021年1月8日.
- 河田幸視(2004),「地域資源としてのエゾシカの最適管理」,『農業経済研究』76(3),p.186-196,日本農業経済学会.
- 環境庁自然保護局(1994),「第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書(干潟・藻場・サンゴ礁調査)第2巻藻場」.
- 水産庁(2007),「藻場の働きと現状」,<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/index.html>,参照日 2020年12月25日.
- 水産庁(2013),「平成25年度水産の動向 平成26年度水産施策」,p.54.
- 水産庁(2015),「改訂磯焼け対策ガイドライン」,全国漁港漁場協会.
- 水産庁(2018),「漁業経営に関する統計 沿岸漁家の漁労所得」,<<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/20.html>>,参照日 2021年1月22日.

東京都中央卸売市場(2020),「東京都中央卸売市場日報、市場統計情報(月報・年報)品目別取扱実績(うに(国内))」,<https://www.shijou-tokei.metro.tokyo.lg.jp/asp/searchresult2.aspx?gyoshucd=2&smode=10&s=2019|11|2020|11|0|1|19|119730&hinmoku_flg=false&gensstr=%E4%BB%A4%E5%92%8C%E5%85%83%E5%B9%B4&genestr=%E4%BB%A4%E5%92%8C02%E5%B9%B4>, 参照日 2020 年 1 月 22 日.

藤田大介(2001),「氷見市・高岡市沿岸の海藻と藻場」,氷見漁業協同組合.

藤田大介(2002a),「磯焼け 21 世紀初頭の藻学の現況」,『日本藻類学会創立 50 周年記念出版』, p.102-105,日本藻類学会.

藤田大介(2002b),「磯焼けの現状」,『日本水産工学会誌』 39(1),p.41-46,日本水産学会.

あとがき

私は大沼あゆみ研究会に所属することで「考えること」と「議論」の重要性を改めて実感した。大沼ゼミの1年目は、先輩方がおらず、同期の皆と試行錯誤しながらゼミ内でのディスカッションや三田論を進めていった。初めから3年生主導でゼミを運営したことは、とても良い経験になったと思う。翌年からは、後輩達が入ってきて、また新しい形でのゼミとなった。特にディスカッションにおいて、新たな観点からの指摘など、後輩達からは良い刺激をもらえた。ゼミの活動を通して、思考力、発言力などパフォーマンスの向上を実感できた。コロナウイルスの拡大によって、2020年は例年とは異なる形でのゼミ開催となり、ゼミ生との交流の時間が少なくなってしまったのが心残りである。しかし、医療関係者等多くの方がコロナウイルスと戦っている中で、オンラインでゼミを行うという判断は間違っていなかったと思う。

最後に、この論文の作成に惜しめないアドバイスをしてくださった大沼あゆみ先生に感謝申し上げます。そして、大沼あゆみ研究会15期、16期生の皆さん、ありがとうございました。

2021年1月31日

慶應義塾大学経済学部
大沼あゆみ研究会 15期
布野 智大