

資源増殖・水産工学シリーズ

磯焼け研究のこれまで、これから

キーワード：磯焼け、ホソメコンブ、群落形成

はじめに

北海道日本海南部の磯焼けは、1950～1960年頃に顕著になったとされています¹⁾。北水試では、1980年代から本格的に磯焼け研究に取り組み始め、研究の概要はいったん本誌31号²⁾にとりまとめられています。その後も研究は継続され、最近では、いろいろな技術革新によって、以前はわからなかったこともわかるようになってきた一方で、磯焼けの海の様子も変わってきています。ここでは、最近の知見も踏まえて、これまでの磯焼け研究でわかってきたことと、これからについて考えてみたいと思います。

冬季の海洋環境

磯焼けを引き起こす要因については、いろいろなことが言われてきました。磯焼けは、一つ、二つの原因ではなく、多くの複合した要因で起こっていると考えられるため、どれも間違いとはいえません。しかし、大きな原因のひとつとして、冬期間の水温上昇とこれに伴う栄養塩の変動があると考えられます²⁻⁴⁾。

冬の北海道日本海南部の海では、どのようなことが起きているのでしょうか。冬になると、気温が低下して海の表面が冷やされます。水温が下がった海水は重くなるので、海の表層から深いところへ沈んでいきます。同時に、深いところにあった栄養塩の豊富な海水が表面に持ち上げられる「鉛直混合」が起こり、表層に栄養塩が供給されます。

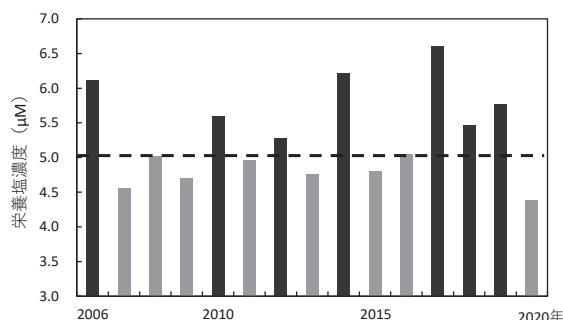


図1 泊沿岸の冬季栄養塩濃度
「温排水 泊発電所温排水影響調査報告書」(北海道) 平成18年度～令和2年度第4四半期の硝酸態窒素の平均値 (一部データは除外した)。

この栄養塩値の上昇は、水温が下がる11月中～下旬頃から始まり、厳冬期の1～2月にピークとなります。表層の栄養塩濃度がどのくらい高くなるかは、対馬暖流の流量、鉛直混合の深度なども関係し、これらの要因は毎年異なるため、表層の栄養塩濃度も年変動します。

近年の冬季栄養塩濃度の推移を見てみます。図1に、北海道原子力環境センターと北海道電力で調べた、泊海域の冬季の栄養塩濃度を示しました。室内培養実験から、コンブ配偶体の成熟・発芽に必要な栄養塩濃度は、 $5 \mu\text{M}$ が目安になることがわかっています⁵⁾ので、これを指標にしてみます。過去15年のうち、栄養塩濃度が $5 \mu\text{M}$ を超えたのは7年、ギリギリか下回ったのが8年ありました。したがって、2年に1回は、配偶体の成熟に必要な栄養塩が供給されなかったことになります。ただし、この栄養塩濃度の測定は、冬の間の1回もしくは2回の観測によって得られたも

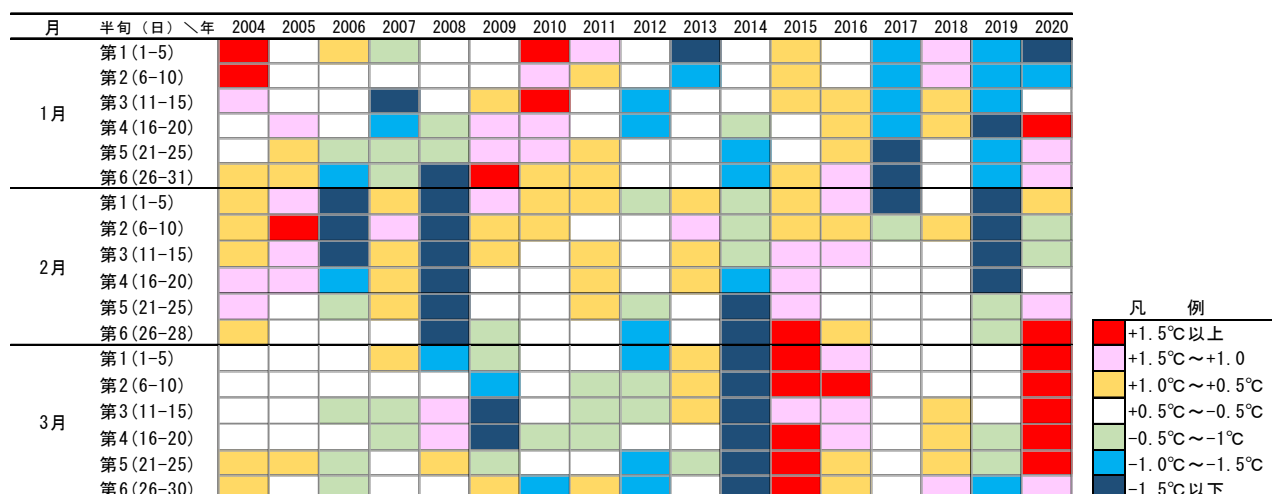


図2 寿都町矢追地区水深2mの冬季水温偏差
各月半旬毎に2004～2020年の平均値からの偏差を示した。

のですから、必ずしもその年の栄養塩の多寡を代表している数値ではないことに注意が必要です。また、2月下旬から3月頃には植物プランクトンが大発生（ブルーミング）して、栄養塩が消費されてしまいますので、コンブが利用できる栄養塩は、初冬からブルーミング時期までとなりますが、年によってこの期間の長さが異なります。コンブが利用できる栄養塩は、期間の累積量となりますので、連続したデータがほしいのですが、栄養塩を連続して測定する実用的な測器は今のところありません。ただし、栄養塩濃度と水温は基本的に逆相関関係にあります^{3)・6)}から、連続観測が行われている水温のデータから冬期間中の栄養塩値を類推することはできます。

図2に、当水試が観測している寿都町矢追地区の冬季水温偏差を示しました。1月から3月にかけての水温は、温暖な年や寒冷な年があることがよくわかりますし、時期別に詳しく見ると、寒冷な年の中でもいろいろなパターンがあることがわかります。たとえば、2008年のように2月は冷たいのですが3月には急速に暖かくなる年、2009年のように2月まで温暖なのに3月に急激に寒冷になる年、また期間を通じて全体に寒冷な年でも

2014年のように2月下旬から3月に極めて寒冷になる場合と、2017年や2019年のように1月から2月上旬を中心に低水温になる年、などの違いがあります。

忍路湾で6月のコンブ生育状況を調べた結果⁴⁾からは、2008年はコンブが大きく密度が高いこと、2014年はコンブの密度は高かったもののサイズはあまり大きくなかったことがわかっています。コンブの生活史を見ると、1月前半は配偶体の成熟期から幼胞子体の発芽期、1月後半以降は胞子体の成長期にあたりますので、成長段階と水温（栄養塩）との関連がありそうです。また、最近では、ドローンによる空撮画像から、各地のコンブ群落の形成状況が比較的容易にわかるようになり、2017年と2019年にはコンブ群落が広範囲に形成されたことがわかっています⁷⁾。このように広範囲にコンブ群落が形成された年の海洋環境が、どのようになっていたのかを総合的に解析し、群落形成との関連性を明らかにするための研究を現在実施中です。

水温・栄養塩といった冬の海洋環境は、広範囲な春のコンブ群落形成に影響を及ぼしますが、一方で河口周辺や岩礁頂部、破碎帯などの浅所にも

コンブ群落が形成されます⁸⁾。このうち、河口周辺は、河川を通じて常時供給される陸域由来の栄養塩が群落形成に関与していると考えられます。一方、浅所に形成されるコンブが利用する栄養塩は、前述の沖合から供給されるものに加えて、その場所の海水の流れが関与します。コンブが吸収できる栄養塩は、単純な海水中の濃度だけでは評価できず、単位時間あたりに藻体表面にあたる栄養塩量で評価の方が適切です。これは「栄養塩フラックス」と呼ばれ、「濃度×流速」であらわすことができます。つまり、環境中の栄養塩濃度が低くても、流れが強ければ単位時間に藻体表面にあたる栄養塩は多くなり、逆に濃度が比較的高

くても、流れが弱い場所では吸収できる栄養塩は少なくなります。

磯焼けが進んだ現在でも、浅い場所でコンブ群落が残っているのはこのためですが、このような場所を細かく見ると、毎年コンブが生える場所がある一方、年によって生えたり生えなかったりする場所があることがわかります。ある場所で、コンブが「生えた年」と「生えなかった年」の冬期間の流動の変化を波向きや地形を考慮して底面流速に置き換え、栄養塩フラックスとコンブ群落形成との関係を調べる研究も進行中です。これが解れば、どのような条件が揃えばコンブ群落が形成されるかが判断可能となるでしょう。

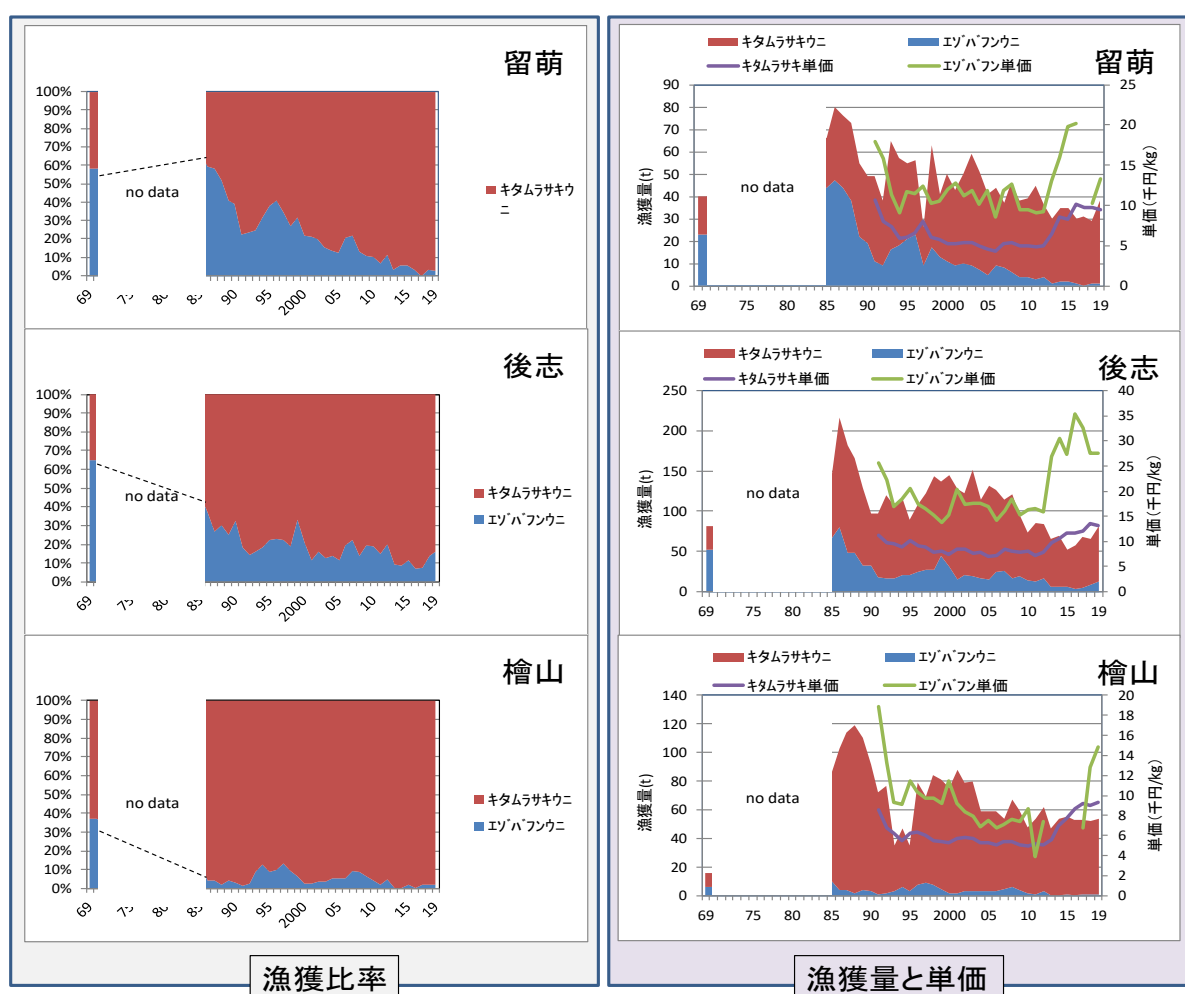


図3 日本海側における主要ウニ2種類の漁獲比率と漁獲量および単価の経年変化
1969年、1985～1989年は水島¹²⁾を用いた。1990～2019年までは北海道水産現勢またはマリネット北海道 (<https://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/index.html>) の集計機能を用いた。

植食動物による食害

環境変動によって減少した海藻群落は、ウニなどの植食動物によって食害されることが磯焼けの回復をより困難にしています²⁾。ウニはコンブを食べることで磯焼けを持続させますが、一般には「食う・食われる」の関係から、海藻群落が減少して餌が少なくなるとウニの個体数が減って食圧が軽減され、その結果、再び海藻群落が増大するという関係が成り立つはずですが、しかし、現状で“ウニは多いまま”、“海藻は少ないまま”の状態が続いています。

実は、ウニと一口で言っても、この海域ではエゾバフンウニとキタムラサキウニの両種が生息しており、前者は海藻しか食べないのに対して、後者は海藻はもちろんですが、雑食性で何でも食べるといったように食性が異なります。このため、エゾバフンウニでは海藻との間に被捕食関係が成立しますが、キタムラサキウニについてはこれが成立しません。また、両種では至適水温も異なっており、比較的低水温を好むエゾバフンウニに対してキタムラサキウニは高温でも生育可能なので、海水温の上昇はキタムラサキウニの生息に働くものと思われます。さらに、1983年にキタムラサキウニの大発生があり、これを機会に当海域のウニはキタムラサキウニの比率が高くなりました(図3左)。そのため、海藻類が激減してもウニによる食害がずっと続いて、磯焼けがなかなか解消しない状況になっています。

最近「ウニブーム」となり、漁獲圧が高まっていることから、ウニの個体数も減少して、食圧も以前に比べれば軽減されていると思われますが、やはり「ウニ除去による密度管理」が磯焼け対策の大きな柱です。しかし、現在の磯焼けの海では、これだけでは不十分かも知れません。

母藻の重要性

磯焼け対策として各地で取り組まれている「ウニの密度管理」ですが、最近ウニを除去しても海藻群落は回復しない事例が見られています⁹⁾。

最初に述べたように、冬の環境がコンブの生育にとって不利な状況が続く現在では、海域全体に広くコンブ群落は形成される年は限られ、多くの年で栄養塩フラックスが高い場所にだけ小規模な繁茂が見られるに過ぎません。コンブは成熟すると葉面に形成された子嚢斑から遊走子を放出します。遊走子は海中に拡散しますが、その範囲は群落規模に比例し、比較的大きな群落からでも数百m程度しか広がりにません⁷⁾。そのため、小規模な群落は点在する状況では、周辺から遊走子が来ない場所が多くなっていると推察されます。こうなると、ウニなどの食害動物がいなくても、タネがないためにコンブ群落は形成されません。また、環境変化等でいったんコンブ群落がなくなってしまうと、すぐには回復しないことがあります。次に、その事例を紹介します。

積丹半島の先端近くに、磯焼けが広がっている場所があります。ここでは、これまでウニ除去などの対策が実施されてきましたが、効果が見られませんでした。磯焼けしている場所から東に400m、西に1 km程度離れた場所にはコンブ群落がありますが、海水の流れをシミュレーションした結果、これらの群落で放出された遊走子は、この場所には到達しづらいことがわかりました⁷⁾。また、実際に現場の海水を調べてもコンブの遊走子はほとんど出現しませんでした。この海底に、人為的にコンブのタネを付けたプレートを設置したところ、翌春には小規模ながらコンブが生育しました。このことは、ここで磯焼け状態が継続しているのはタネ不足が主な原因であること、また、地形的に周辺のコンブ群落から遊走子が供給され

づらい場所があることを示しています。ここで形成されたコンブ群落については、その後の顛末があるのですが、紙面の都合上、割愛します。詳しく知りたい方は既報^{10,11)}をご覧ください。

寿都町には、ウニの食圧を防ぐ目的で水深を浅くした施設（以下、「かさ上げ礁」）があります。ここでは、ウニの食圧は制御されており、礁の設置当初には大規模なコンブ群落が形成されました。しかし、徐々に群落規模が小さくなり、2015年には礁上のコンブは枯渇してしまいました。この状態は2016年も継続し、礁上には母藻となるコンブは存在していませんでした。2017年は冬の栄養塩環境が極めて良く、広い範囲でコンブ群落が形成された年です。ウニの影響がないかさ上げ礁では、冬の環境がダイレクトに春のコンブ繁茂に反映されるはずですから、この年は濃密な群落形成されるはずでした。ところが、かさ上げ礁上にはわずかなコンブ繁茂が見られたのみでした。これは前年秋の母藻が皆無だったためにタネ不足が大きな障害となり、2017年の好環境でも群落形成がされなかったものと思われます。それでも、この年の環境が“極めて”良かったことから、かさ上げ礁から300 mほど離れた場所にあるコンブ群落から供給されたタネが、わずかながらのコンブ生育に寄与したのでしょう。この群落は、小さいながらも秋まで残存したため、これが母藻となり2018年以降のかさ上げ礁は濃密なコンブ群落が形成され続けています。

母藻の存在と翌春のコンブ群落形成について検討するため、かさ上げ礁で2006～2020年まで蓄積したデータを使って「決定木分析」を行ってみました。決定木分析というのは、結果に対して、解析に用いた因子がどのように関与しているかを樹状の図で表したもので、各因子の関与度合いや関係を視覚的にわかりやすく示すことができるもの

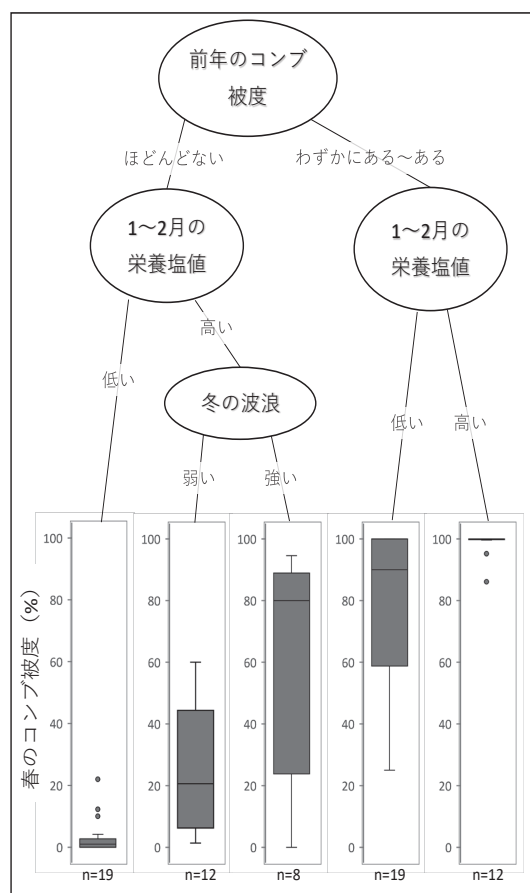


図4 かさ上げ礁での調査結果を用いた決定木分析
2006～2020年の調査結果等（本文参照）を用いた。フリー統計ソフトRによる。

です。結果となる「春のコンブ被度（海底面のうち、コンブが占める割合）」に影響を与える要因として、1～2月の「水温実測値」、「水温から換算した栄養塩値」、「波浪推計値から計算した波浪強度」と「前年秋のコンブ被度」を因子として用いました。その結果、「春のコンブ群落被度」に最も影響を与える（決定木では一番上の分岐）のは、「前年秋のコンブ被度」となりました。これがわずかながら（被度3.4%以上）でもあり、かつ「栄養塩」が高ければかなりの確率で「春のコンブ被度」が高くなります（決定木の一番右の系）。逆に、「前年秋のコンブ被度」がほとんどない場合に「栄養塩」が低いと春の群落はほとんど形成されていない（決定木の一番左の系）ことがわかりました（三好、未発表、図4）。この結果は、

各因子の与え方などにまだ検討の余地がありますが、かさ上げ礁のコンブ群落の形成はまず「前年秋のコンブ被度」が必要で「栄養塩」や「波浪」はその次に必要な因子であり、これらの影響を受けて最終的な「春のコンブ群落被度」が決まっている可能性を示しています。

「前年秋のコンブ被度」は「母藻の有無」を表しています。コンブの遊走子は、1本の母藻から膨大な量が産出されますが、一方で、前述の通り、遊走子の拡散範囲はそれほど広くありません。群落形成のためには、わずかな量でも“近く”に母藻があることが重要だと考えられます。今後は、群落維持のための母藻の役割について、多角的な研究を進めて行きたいと考えています。

磯焼け研究のこれから

北海道日本海南部の磯焼けは、発生から50年以上経過しました。磯焼けの大きな原因の一つが長期的な海洋環境の変化にあるとすれば、私たちの力で全面的に解消するのは難しいでしょう。一方で、小規模な群落は、まだあちこちに見られますから、その形成条件を詳細に調べることで、どのような条件が揃えばコンブ群落が形成されるのか？欠けている条件をどう補えば群落を形成させることができるのか？を検証していきます。これらがわかってくると、すべての場所で同じメニューの磯焼け対策を実施するのではなく、その場所に最も適した対策を立てることが可能になります。また効果の期待度を事前に示すことができるようになり、投資と経済効果の観点から、対策を実行すべきかどうかの判断もできるようになり、これまでよりも効率的かつ経済的に施策を進めていけるようになるでしょう。水産試験場では、これまでも、そしてこれからも海の環境変化に対応した研究を進めていきます。

参考文献

- 1) 藤田大介 (1987) 北海道大成町の磯焼けに関する聞き取り調査, 水産増殖, 35 (3), 135-138.
- 2) 吾妻行雄 (1995) 北海道南西部沿岸の磯焼け, 北水試だより, 31, 3-9.
- 3) 飯泉 仁 (2000) 2. 北海道日本海沿岸の磯焼け, 「水産業の再生戦略」, 恒星社厚生閣, 東京, 27-48.
- 4) 干川 裕, 秋野秀樹, 高橋和寛, 津田藤典 (2018) 北海道忍路湾における6月のホソメコンブ現存量と密度に及ぼす秋季から春季の水温の影響について, 水産工学, 55 (2), 123-133.
- 5) Mizuta M, Narumi H, Yamamoto H (2001) Effects of nitrate and phosphate on the growth and maturation of gametophytes of *Laminaria religiosa* Miyabe (Phaeophyceae), *Suisan-zoushoku*, 49, 175-180.
- 6) 中多章文, 八木宏樹, 宮園 章, 安永倫明, 川井唯史, 飯泉 仁 (2001) 忍路湾における沿岸水温と栄養塩の関係, 北海道水産試験場研究報告, 59, 31-41.
- 7) 高谷義幸, 川井唯史, 秋野秀樹, 三好晃治, 福田裕毅, 安永倫明, 栗林貴範, 園木詩織, 合田浩朗 (2021) 4. ホソメコンブ群落の変動と遊走子供給機能に関する研究 (経常研究), 北海道立総合研究機構中央水産試験場事業報告書, 印刷中.
- 8) 高谷義幸 (2021) 磯焼け海域におけるコンブ群落規模の年変動－地形によるちがいは－, 試験研究は今, 934, <https://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/work1/ima934.html>.
- 9) 干川 裕 (2016) ホソメコンブ遊走子を付けた石材による新たな藻場造成手法の取組, 北水試だより, 93, 19-21.
- 10) 高谷義幸, 秋野秀樹 (2018) 磯焼けが回復しない！－要因の一つはコンブのタネ不足？－, 育てる漁業 (北海道栽培漁業振興公社), 481, 3-7.
- 11) 高谷義幸 (2020) 磯焼け海域での小規模コンブ群落形成実験とその消長, 北水試だより, 101, 3-6.
- 12) 水島敏博 (1992) 日本海のウニ漁業と資源の動向, 北水試だより, 18, 1-13.

(高谷義幸 中央水試資源増殖部 報文番号B2463)