

平成31年度
水産庁 水産基盤整備調査委託事業
「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に
基づく漁場造成適地選定手法の開発」
報告書

令和2年3月

国立研究開発法人水産研究・教育機構
地方独立行政法人北海道立総合研究機構

平成 31 年度 水産基盤整備調査委託事業
天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発
年次報告書

1. 課題名

天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発

【小課題】

- ア. 海洋環境特性の把握
- イ. コンブの生物特性および生息環境条件の推定
- ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発
- エ. 天然コンブ漁場造成・管理に係わる方策の検討

2. 実施機関及び担当者

ア. 海洋環境特性の把握

国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所 副所長	黒川忠英
生産環境部資源増殖グループ グループ長	伊藤 明
国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所 沿岸・内水面研究センター沿岸漁場生産グループ グループ長	鬼塚年弘

イ. コンブの生物特性および生息環境条件の推定

地方独立行政法人北海道立総合研究機構釧路水産試験場 調査研究部 部長	中多章文
研究主幹	山口浩志
研究職員	園木詩織
地方独立行政法人北海道立総合研究機構稚内水産試験場 調査研究部管理増殖グループ 主査	秋野秀樹
地方独立行政法人北海道立総合研究機構中央水産試験場 資源増殖部水産工学グループ 主査	福田裕毅
国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所 副所長	黒川忠英
生産環境部資源増殖グループ グループ長	伊藤 明
国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所 沿岸・内水面研究センター沿岸漁場生産グループ グループ長	鬼塚年弘

ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発

国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所 副所長	黒川忠英
生産環境部資源増殖グループ グループ長	伊藤 明
国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所 沿岸・内水面研究センター沿岸漁場生産グループ グループ長	鬼塚年弘
地方独立行政法人北海道立総合研究機構釧路水産試験場 調査研究部 部長 研究主幹 研究職員	中多章文 山口浩志 園木詩織
地方独立行政法人北海道立総合研究機構中央水産試験場 資源増殖部水産工学グループ 主査	福田裕毅

エ. 天然コンブ漁場造成・管理に係わる方策の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所 副所長	黒川忠英
生産環境部資源増殖グループ グループ長	伊藤 明
国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所 沿岸・内水面研究センター沿岸漁場生産グループ グループ長	鬼塚年弘
地方独立行政法人北海道立総合研究機構釧路水産試験場 調査研究部 部長 研究主幹 研究職員	中多章文 山口浩志 園木詩織
地方独立行政法人北海道立総合研究機構稚内水産試験場 調査研究部管理増殖グループ 主査	秋野秀樹
地方独立行政法人北海道立総合研究機構中央水産試験場 資源増殖部水産工学グループ 主査	福田裕毅

3. 本事業の概要

1) 目的

コンブの生活史と水温、栄養塩、光環境を中心とした海洋物理環境との関係を明らかにし、コンブの生育に好適な環境条件の特定とそれに基づく適地選定・評価手法を開発するとともに、それらの成果を取り入れた形で天然コンブの生育適地選定・評価に関する指針を取りまとめる。

2) 成果の概要

ア. 海洋環境特性の把握

北海道東部太平洋沿岸に設定した3調査点（納沙布、厚岸、釧路）において、4～10月に水温、光環境の機器観測を行うとともに、納沙布、落石、厚岸、釧路において月3回程度海水を採取し、栄養塩（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン）濃度の分析を実施した。調査点間で結果を比較し、コンブ漁場における物理環境の季節的、空間的な変動パターンを把握した。水温、光環境、栄養塩にはいずれも季節的な変化が認められ、栄養塩については地域間で季節変動パターンが異なることが示された。

イ. コンブの生物特性および生息環境条件の推定

(ア) 遊走子放出の時期、量的変化の把握

根室市落石沿岸のコンブ漁場およびその周辺海域において、8～12月に定期的に海水を採取し、培養法とPCR法によりコンブ類遊走子量の季節変化を明らかにした。コンブ遊走子の放出盛期である秋季に、複数の調査点において海水を採取してナガコンブ遊走子数の定量分析を行い、遊走子分布の特徴を明らかにした。

(イ) 配偶体の受精および幼胞子体の成長と物理環境との関係解明

配偶体の成熟および幼胞子体の成長と環境との関連を明らかにするために、室内培養試験を実施した。天然海域から採集したナガコンブ母藻由来の配偶体と幼胞子体を用いて、流速を4段階に変化させた飼育実験を実施し、流速がコンブの配偶体の成熟、幼胞子体の成長に及ぼす影響を明らかにした。データ解析により流速と配偶体の成熟率、幼胞子体の相対成長速度の関係を数式化した。

(ウ) 胞子体の成長・成熟と物理環境との関係性の推定

コンブ胞子体の成長・成熟と物理環境（水温、栄養塩、光）との関わりを推定するために、飼育試験データの整理・解析を実施した。ナガコンブ胞子体の成長に影響を及ぼす環境条件は季節により異なり、前年11月から当年3月の栄養塩（窒素）の水準、当年1月から5月の光量がコンブの成長に重要な役割を果たすことが明らかとなった。また、水温が10℃に達するタイミングでコンブの成長が停滞し始め、成熟へ移行することが明らかとなった。

(エ) コンブの生息環境条件の推定

根室市落石地区において、地先のコンブ類の分布、コンブ漁場データおよび物理環境データを収集・整理した。GIS解析によりコンブ種別の生育環境条件を推定した結果、コンブの種により生育に必要な地形や物理環境条件が大

大きく異なることが明らかとなった。コンブ生育に関する漁場データと環境データを用いた解析により漁場におけるコンブ生育を左右する環境要因と閾値が推定され、ナガコンブ胞子体の生育の高低を水深、傾斜度、最大傾斜度、底質および底面流速から判定することが可能となった。

ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発

モデル海域である落石地区について、海底地形、水深等の物理環境、上記アで得られた環境データおよびコンブ漁場に関するデータを収集・整理し、デジタル化、加工・調整作業を行った後、GIS に取り込んだ。上記イ-（エ）で得られたコンブ種ごとの生育環境条件に基づいてコンブ類の分布ポテンシャルを示すマップを作成した。上記イ-（エ）で得られた各生育段階のナガコンブの生育環境条件に基づき、環境データからGIS のグリッド毎に配偶体の成熟率、幼胞子体の成長速度、大型胞子体の生育を推定し、ポテンシャルマップを作成した。作成されたポテンシャルマップから、ナガコンブの生育に必要な環境が揃った“生育適地”の選定が可能となった。また、生育不適地と判定された場所についてもコンブの生育における制限要因の評価・特定が可能となった。

エ. 天然コンブ漁場造成・管理に係わる方策の検討

コンブ漁場に関する基礎資料と上記ア、イ、ウの成果を活用し、天然コンブの漁場造成・管理および環境整備に向けた生育適地選定・評価のための手順、技術的な方法を示したガイドラインを取りまとめた。

4. 実施報告

以下に課題別に、目的、調査方法、結果・考察、今後の課題、引用文献について示す。

ア. 海洋環境特性の把握	6
イ. コンブの生物特性および生息環境条件の推定	10
ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発	32
エ. 天然コンブ漁場造成・管理に係わる方策の検討	44

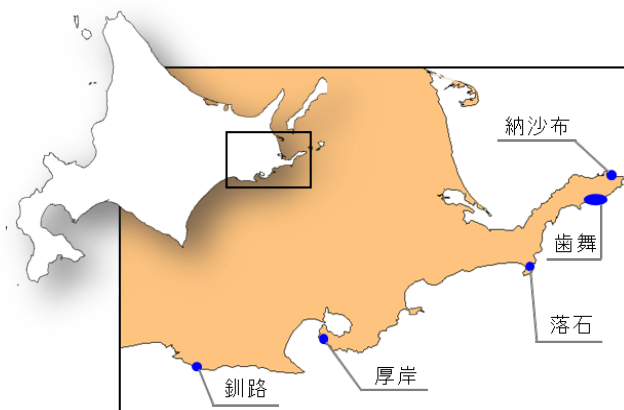
ア. 海洋環境特性の把握

【目的】

北海道東部太平洋沿岸において、コンブの生育に影響を及ぼす海洋環境（水温、光環境、栄養塩）を定期的に観測・分析し、コンブが生育する沿岸域の海洋環境特性および時空間的変動パターンを把握する。（進行管理：国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所）

【方法】

北海道東部太平洋沿岸に位置する納沙布、厚岸、釧路地先において（図ア-1）、2017年10月から2019年10月に海辺の遮蔽物のない建物の屋上に自記式照度計を設置し（表ア-1）、光環境を継続的に測定した。また、コンブ漁場に隣接した4ヶ所（図ア-1、表ア-1；納沙布、歯舞、厚岸、釧路）の海底もしくは揚水施設の貯水槽内（常時ポンプで海から貯水槽内に揚水しているため類似した水温を示す）に自記式水温計を設置し、継続的に水温データを収集した。海水中の栄養塩を観測するために、同期間中に概ね週1回の頻度でコンブ漁場に隣接した5ヶ所（図ア-1、表ア-1；納沙布：根室市水産研究所貯水槽、歯舞：沖根婦漁港周辺、落石：落石漁港周辺、厚岸：北海道区水産研究所厚岸庁舎貯水槽、釧路：同釧路庁舎貯水槽）において海水を採集し、機器分析によりコンブの生育に必要とされる硝酸態窒素（NO₃）、亜硝酸態窒素（NO₂）、リン酸態リン（PO₄）の濃度を測定した。



図ア-1. 調査海域図

調査海域	調査項目		
	栄養塩	水温	光
納沙布	○	○	○
歯舞	○	○	
落石	○		
厚岸	○	○	○
釧路	○	○	○

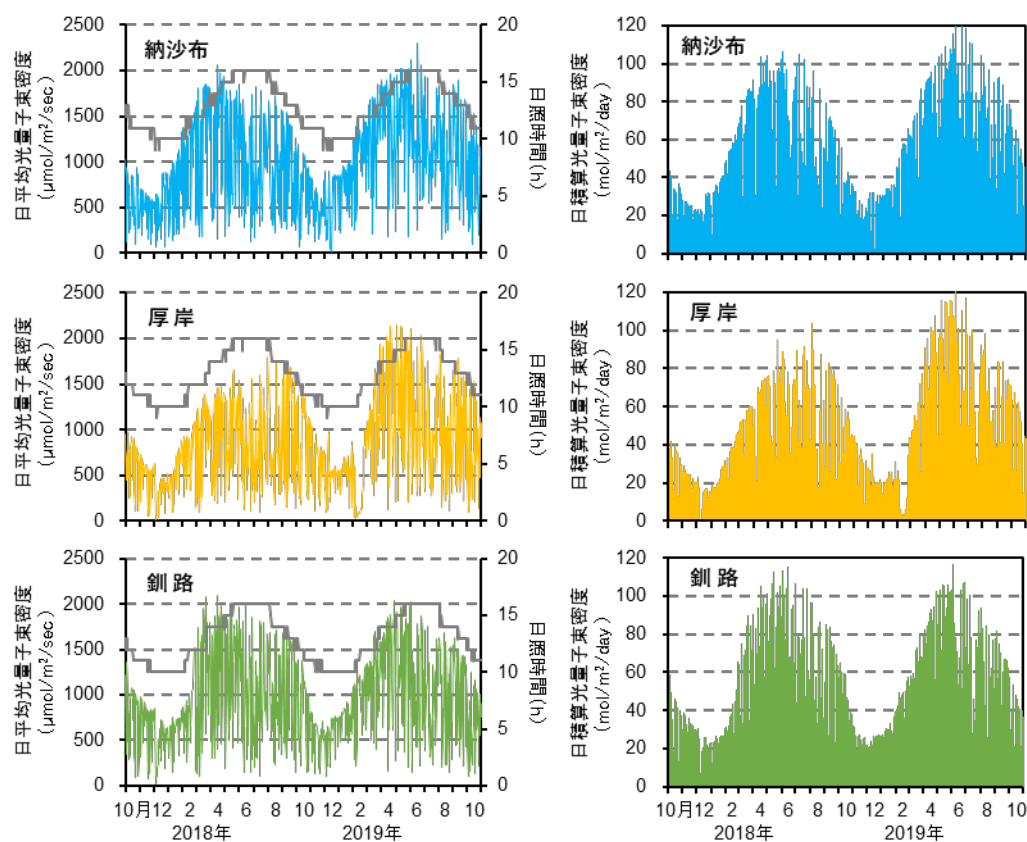
表ア-1. 調査海域および調査項目

【結果と考察】

日照時間は、納沙布、厚岸、釧路ともに12～1月に最短（約10時間）となり、6～7月に最長（約16時間）となった（図ア-2）。日平均光量子束密度 [Thimijan and Heins (1983)¹⁾に基づき、照度を光量子束密度（波長領域：400-700 nm）に換算した後に算出] は、天候に左右されたが納沙布、厚岸、釧路ともに12月に最小（500-550 μmol/m²/sec）となり、1月以降に上昇し3～5月に最大（約2000 μmol/m²/sec）となった（図ア-2）。6月以降は、12月にかけて徐々に減少した。日積算光量子束密度 [日積算光量子束密度 (mol/m²/day) = 日平均光量子束密度 (μmol/m²/sec) × 日照時間 (sec) ÷ 10⁶] は、いず

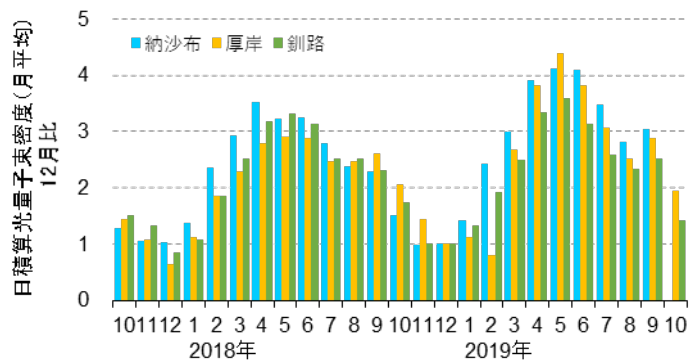
れの地点でも 12 月に最小 (約 $20 \text{ mol/m}^2/\text{day}$) となり、その後上昇して 5 月に最大 (納沙布、釧路： $100\text{-}120 \text{ mol/m}^2/\text{day}$ 、厚岸：約 $90\text{-}120 \text{ mol/m}^2/\text{day}$) に達し、6 月以降は 12 月にかけて減少した (図ア-2)。日積算光量子束密度の月平均値は、12 月に最低となった後、1~4 月に急激に増加し、5 月に最高値を記録した (図ア-3)。春先は日積算光量子束密度の上昇が特に著しく、5 月には 12 月比で 3~4 倍の日積算光量子束密度に達した (図ア-3)。6 月から 9 月にかけては、北海道東部太平洋沿岸特有の濃霧や台風・低気圧の接近・通過に伴い雨天、曇りの日が増加し、日平均光量子束密度、日積算光量子束密度ともに低下した。そのために、日照時間が最大となる夏至頃 (6 月) ではなく、5 月に日積算光量子束密度が最大になると推察される。このような光量の季節変化は北海道東部太平洋沿岸域の特徴と言える。日積算光量子束密度が急激に増加する 1~6 月は、同海域に生育するナガコンブの成長期と一致しており、年間を通じて最大の日積算光量子束密度に達する 3~6 月がナガコンブの成長盛期にあたることから、ナガコンブの成長は光環境に強く影響されていると考えられる。光量の季節変動パターンは地域間で類似していたが、春から夏にかけての日平均光量子束密度および日積算光量子束密度には地域差が認められた。これは局所的な天候が地先のコンブの生育に影響を及ぼす可能性を示している。

リン酸態リン (PO_4) については、夏季の一時期に落石地先において濃度が上昇したが、その他の場所では周年にわたり濃度の変動は小さく、 $0.5\text{-}2.0 \mu\text{M}$ の水準で維持されていた。

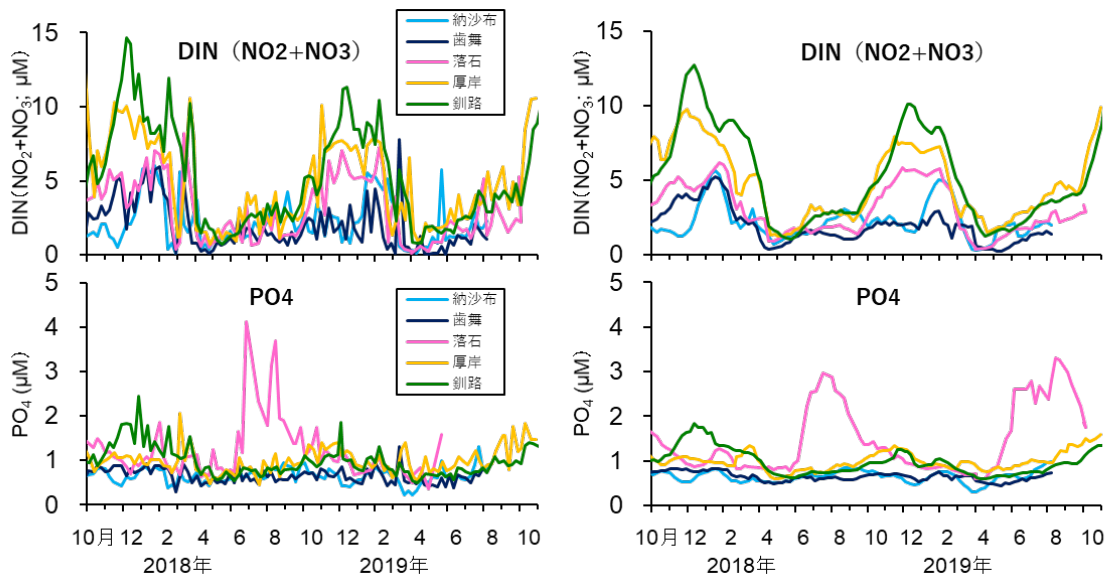


図ア-2. 納沙布、厚岸、釧路における日平均光量子束密度、日照時間 (左図)、日積算光量子束密度 (右図) の変化

納沙布、齒舞、落石、厚岸、釧路のいずれの調査点においても、海水中の DIN [硝酸態窒素 (NO₃) + 亜硝酸態窒素 (NO₂)] の濃度には季節的変化が認められた (図ア-4)。特に、DIN については特徴的な時空間変動パターンが見られた。9 月以降に西部の釧路、厚岸地先において先に DIN 濃度が上昇し始め、その後東部の納沙布、齒舞、落石においても徐々に濃度が上昇した。いずれの調査点においても 12~3 月には DIN 濃度は比較的高い水準を維持し、3~4 月に急激に濃度が低下した後は 8 月まで低い水準 (3 μM 以下) で推移していた (図ア-4)。3~4 月に認められた DIN 濃度の急激な低下は、春先の植物プランクトンの大規模増殖 (春季ブルーム) により海水中の窒素が急速に利用されたことに起因すると考えられる。2017 年 10 月から 2019 年 10 月までの調査期間中には、釧路では納沙布と比べて DIN の最大濃度が 2 倍程度高く、5 μM 以上の高水準期間も長かった (図ア-4)。周年にわたり東から西に向かって流れる海流に支配されている北海道東部太平洋沿岸において、上流域 (納沙布、齒舞、落石) よりも下流域 (釧路、厚岸) で DIN の高水準期間が長期間持続するという結果は、上流域以外から沿岸域への窒素供給過程が存在することを示唆している。このような各地先間での栄養塩供給パターンの相違は、コンブの生育に大きな影響を与えている可能性がある。



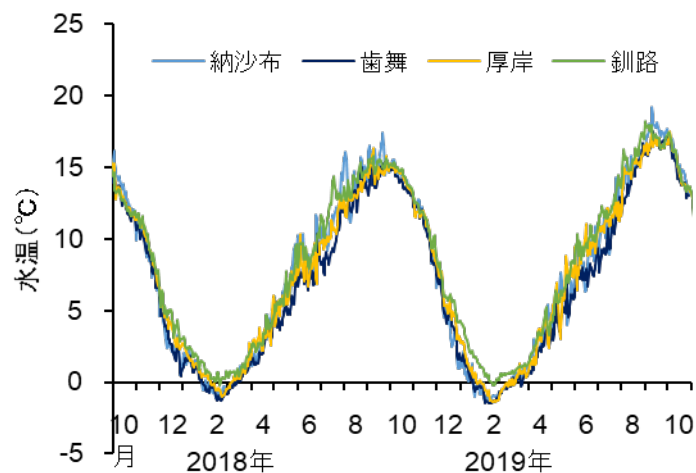
図ア-3. 納沙布、厚岸、釧路における日積算光量子束密度の変化 (月平均値-2018 年 12 月値比として表示)



図ア-4. 納沙布、齒舞、落石、厚岸、釧路における DIN、PO₄ の変化
左列：実測値、右列：5 週移動平均値

地先の水温は、納沙布、歯舞、厚岸、釧路のいずれについても2月が最低(-1~0℃)、8~9月に最大(15~18℃)となった。10~11月には水温の地域差はほとんど認められなかったが、5~9月は変動幅、地域差ともに顕著に大きくなった。(図ア-5)。冬季の最低水温に顕著な経年変化は認められなかったが、夏季の最高水温は年により2~3℃程度異なり、春の昇温および秋の降温のパターンにも年変動が認められた。

以上の結果から、コンブが生育する沿岸域の海洋環境は地先ごとに異なり、それがコンブの生育、漁場の形成に関与している可能性が示された。コンブの生育適地選定を行う場合には、対象海域における海洋環境(水温、光環境、栄養塩)の時空間的な変動を十分に考慮する必要がある。



図ア-5. 納沙布、歯舞、厚岸、釧路における海水温の変化

【参考文献】

- 1) Thimijan R.W., Heins R.D. (1983) Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion. HortScience 18(6): 818-822.

イ. コンブの生物特性および生息環境条件の推定

【目的】

適地選定手法開発の基礎資料となるコンブの生物学的特性および生育環境条件を把握するために、野外調査、飼育試験、データ解析を実施する。コンブ遊走子の放出・分布状況を明らかにするとともに、コンブの成長・成熟と海洋物理環境との関係について検討する。コンブの分布、環境情報に基づき、コンブ種ごとの生育環境条件を推定するとともに、漁場間での生育差を生ずる要因とその閾値について検討する。(進行管理：国立研究開発法人 水産研究・教育機構 北海道区水産研究所)

【細部課題】

以下の3課題を実施した。

(ア) 遊走子放出の時期、量的変化の把握

コンブ遊走子の時空間的な分布を把握するために、モデル海域に設定した調査点から定期的に海水を採取し、遊走子の放出量の時間的変化を調査する。培養法¹⁾またはPCR法²⁾を用いて、海水に含まれるコンブ類の遊走子数を推定する。調査点の海洋環境を毎月観測するとともに、調査点近傍に生育するナガコンブを採集し、葉長、重量の変化および成熟の有無(遊走子の放出が行われる“子嚢斑”が葉表面に形成されているか否かで判断される)を調査し、遊走子の放出状況と比較する。(地方独立行政法人北海道立総合研究機構 釧路水産試験場)

(イ) 配偶体の受精および幼孢子体の成長と物理環境との関係解明

コンブの生育は、水温、栄養塩、光、流速などの物理環境の影響を強く受ける。幼孢子体の成長とこれらの物理環境との関連を明らかにするために、流速および栄養塩条件の変化に対するコンブの応答を室内培養試験により検討する。(地方独立行政法人北海道立総合研究機構 稚内水産試験場・中央水産試験場)

(ウ) 孢子体の成長・成熟と物理環境との関係性の推定

コンブ孢子体の飼育実験データを整理・解析し、コンブ孢子体の成長、成熟と物理環境(水温、栄養塩、光量)との関係性について検討する。(国立研究開発法人水産研究・教育機構 北海道区水産研究所)

(エ) コンブの生息環境条件の推定

コンブ類の生育環境条件を推定するために、モデル海域においてコンブ類の分布、物理環境情報に関するデータを収集するとともに、コンブの生育に影響を及ぼすと考えられる底面流速等のパラメーターの値を算出する。コンブの分布、環境データを用いたGIS解析によりコンブ種別の生育環境条件を推定する。また、地先の漁業協同組合が実施しているコンブ生育に関する調査データと環境情報を用いた解析により漁場間でのコンブの生育差を生ずる要因と閾値について検討する。(国立研究開発法人水産研究・教育機構 北海道区水産研究所、地方独立行政法人北海道立総合研究機構 釧路水産試験場・中央水産試験場)

(ア) 遊走子放出の時期、量的変化の把握

【方法】

根室市落石沿岸をモデル海域とし、海水に含まれるコンブの遊走子数の季節変化を調査するとともに、ナガコンブの成熟状況等を調査した。調査は、落石漁業協同組合所有の船舶（わかしお丸、4.2 トン）を用いて行った。

遊走子の放出量の時間的变化

2016年6月から2018年12月の各月に St. A（図イ-(ア)-1）のコンブ群落からナガコンブをランダムに採集した。採集したサンプルは、2年生コンブの2016年級と1年生コンブの2017年級に分類し、葉長、重量を測定し、葉状部表面の子嚢斑の形成状況を観察した。また、2017年6月から2019年12月にかけてナガコンブを採集した地点を含む複数点（図イ-(ア)-1、St. A、B、C）の表層から海水を採取し、保冷した状態で実験室に輸送した。採水時に水質計（直読式総合水質計 AAQ-RINKO：JFE アドバンテック株式会社）を用いて、深度別の水温、塩分、水中光量子量などの海洋環境情報を取得した。

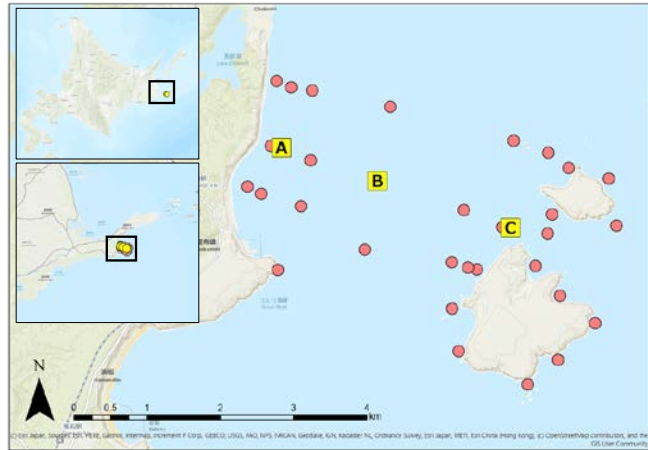
採取した海水に含まれる遊走子は、コンブ類の孢子体発生数を計数する培養法¹⁾と、ナガコンブの DNA 量を定量分析する PCR 法²⁾により推定された。

培養法について、実験室において採取した海水 200 ml を孔径 0.45 μm のメンブレンフィルター（アドバンテック株式会社）でろ過し、フィルターを栄養強化（PESI 培地）海水下で静地培養した。栄養強化海水は7日毎に交換した。約30日後に、実体顕微鏡を用いてフィルター上に出現したコンブ類孢子体を計数し、海水中のコンブ遊走子数の指標とした。2018年6月19日と7月12日には、培養試験の際にフィルター上に出現したコンブ類孢子体を計数後に取り出し、栄養強化海水中でさらに30日間通気培養し、孢子体の形態的特徴を比較した。

PCR 法について、海水 30 ml をシリンジとメンブレンフィルターでろ過した後、DNeasy Plant Maxi Kit（QIAGEN）を用いてフィルター上に含まれる DNA を抽出した。リアルタイム PCR 分析でナガコンブの DNA を定量分析し、海水中のナガコンブ遊走子数の指標とした。

遊走子の空間分布

2018年9月18日と2019年9月11日に根室市落石沿岸の調査点（図イ-(ア)-1、n=30）において、表層から海水を採取し、海水 30 ml をシリンジとメンブレンフィルターでろ過した。DNeasy Plant Maxi Kit（QIAGEN）を用いてフィルターから DNA を抽出し、リアルタイム PCR 分析²⁾でナガコンブの DNA を定量分析し、ナガコンブ遊走子数の空間的な分布状況を調査した。



図イ-(ア)-1. 根室市落石の調査点。St. A：藻体採集地点。St. A～C：毎月の遊走子調査、丸は空間分布の調査点。

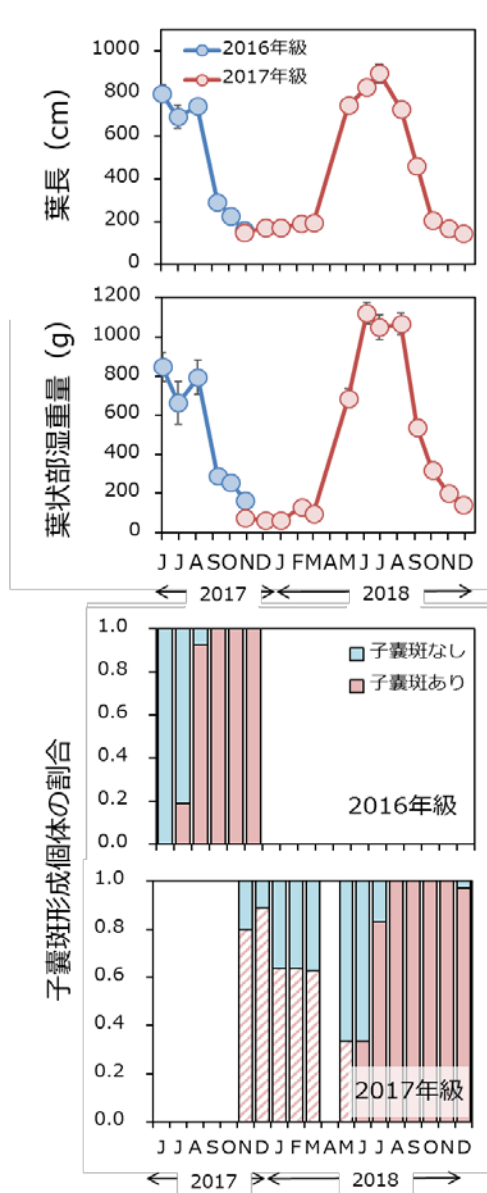
【結果と考察】

遊走子の放出量の時間的变化

根室市落石沿岸の St. A で採集した 1 年生ナガコンブは、2017 年 11 月には基部に新葉を形成して再成長を開始し、2 年生に移行した。2017 年 12 月から 2018 年 3 月は、平均葉長に大きな変化は認められなかったが、3~5 月に著しく伸長した。2018 年 7 月には平均葉長約 9 m に達し、2017 年に同所で採集したナガコンブ (2017 年 6 月に最大約 8 m) よりも長かった。また、葉状部の平均湿重量は、2017 年 6~8 月は 660~850 g であったのに対し、2018 年の 6~8 月はいずれの月も 1,000 g 以上で 2017 年よりも重かった (図イ-(ア)-2)。したがって、2018 年のナガコンブの生育 (伸長成長と増重) は 2017 年より良好であったと考えられた。

1 年生ナガコンブ時に形成した子嚢斑は、2017 年 11 月から 2018 年 5 月まで認められ、新葉の成長に伴い先端部へと移動した。新たに葉状部基部付近に子嚢斑を形成した藻体は、2018 年 6 月から認められ、7 月には 8 割以上の藻体に子嚢斑が確認された (図イ-(ア)-2)。2017 年 6 月は子嚢斑を有する藻体は採取されず、7 月には採取した藻体の約 2 割に子嚢斑が形成されていたことから、2018 年は 2017 年より成熟が早く進行したと考えられた。

30 日間の培養で得られた胞子体数から推定した海水 1 ml あたりの遊走子数は、それぞれの地点で年により変動したが、秋から冬にかけて増加し、9 月ごろに最大となる傾向が認められた (図イ-(ア)-3 棒グラフ)。ただし、2018 年の St. A では、12 月がピークとなっていた。PCR 法で得られたナガコンブ遊走子の DNA 数は、培養法で得られた結果と同様、出現数に年変動はあるものの、秋から冬にかけて DNA 数が多くなる傾向が見られ、培養法の結果と傾向が類似していた (図イ-(ア)-3)。調査地点間では、St. B では遊走子数・DNA 数が調査期間中のすべての月で最も少なかった。また、地点ごとにそれぞれ対応のある t 検定 (両側検定) で月ごとの遊走子数・DNA 数を比較したところ、いずれも St. B と St. C には有意差があった ($p < 0.05$) が、St. A と St. B, C との間には有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。このことから、調査を行った 2017 年 6 月から 2019 年 9 月の間では St. C が最も遊走子数・DNA 数が多く、St. B は最も少なく、St. A は両者の



図イ-(ア)-2. 2017 年 6 月から 2018 年 12 月に St. A で採集したナガコンブの葉長、葉状部湿重量、子嚢斑形成個体の割合の季節変化。斜線部は、1 年生ナガコンブ時に形成された子嚢斑であることを示す。

中間値であることがわかった。

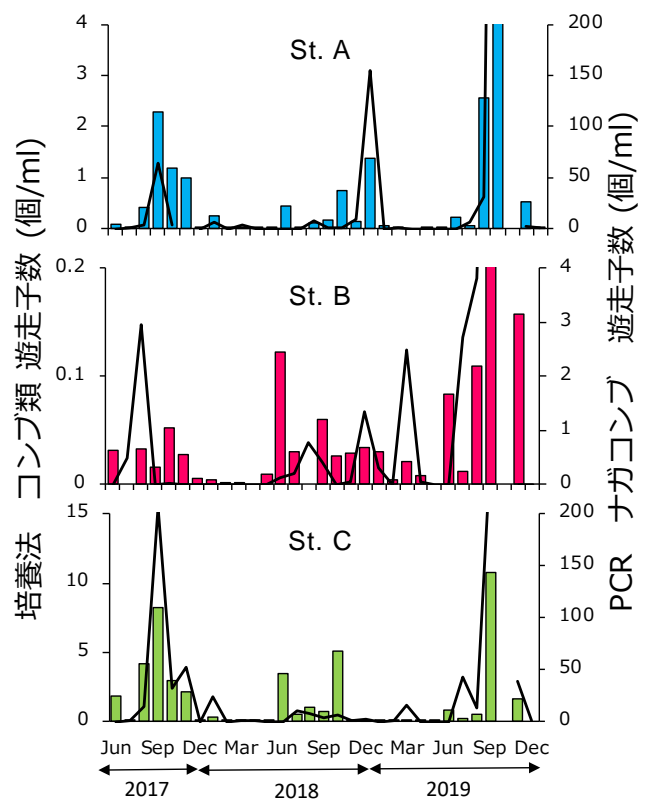
2018年6月19日と7月12日に採取した海水から出現したコンブ類胞子体を60日間通気培養し、胞子体の形態を比較したところ、6月の胞子体の葉状部には明瞭な中肋がみとめられ、形態的な特徴からアイヌワカメであると推測された。一方、7月の胞子体の葉状部表面には中肋はみとめられず、ナガコンブまたはガッガラコンブであると推測された。これによって、2018年6月に採取した海水中に含まれていたコンブ類遊走子はアイヌワカメであったと考えられた。

遊走子の放出時期について、2018年の St. A では、遊走子の盛期が他の年と比較して遅れていた。2018年は2017年よりもナガコンブの成長が良好で、子嚢斑の形成（成熟）も早く進行していたことが確認されているため、母藻の生育不良とは考えにくい。2018年の St. A～C の水深1mにおける7～9月の水温は、3地点ともに2017年より低く推移

していた。一方、2018年10月～12月は St. B, C では前年より1～2℃高めに推移していたのに対し、St. A では前年より1～5℃低い水温で推移しており、海域ごとに水温の傾向が異なっていた。2019年はいずれの地点においても例年よりも水温は高めに推移していた。このため、2018年においては St. A と B, C の間で水温の傾向が異なっていたことが遊走子放出時期の差につながったと考えられる。以上のことから、ナガコンブの遊走子放出時期は、藻体の成熟状態に加え、水温などの環境要因の影響を受けることが示唆された。

調査地点間で遊走子数・DNA数に差が見られた。St. A, C では、年変動は認められたが比較的高密度で遊走子が分布していた。St. A, C はどちらもコンブ藻場が存在する海域であり、コンブ群落から遊走子が放出され、資源加入にも貢献していると考えられる。推定された遊走子量が最も少なく、全く検出されない時期もあった St. B は落石沿岸とユルリ島・モユルリ島の海峡に位置する観測点で、水深が約15mと深く、周辺にコンブ漁場は見られない。一方で、季節的な変動はあるが培養試験では胞子体の発生も認められた。これらの結果から、St. B では最短距離で約2km離れた岸沿いに分布するコンブ漁場から遊走子が供給されていると考えられる。

培養法・PCR法の2手法の遊走子数・DNA量の増減の傾向を比較したところ、2017年9月の St. A～C、2018年12月の St. A、2019年9月の St. A～Cにおいて、両手法のピークが一致していた。2手法によって、海域全体におけるナガコンブの遊走子放出の



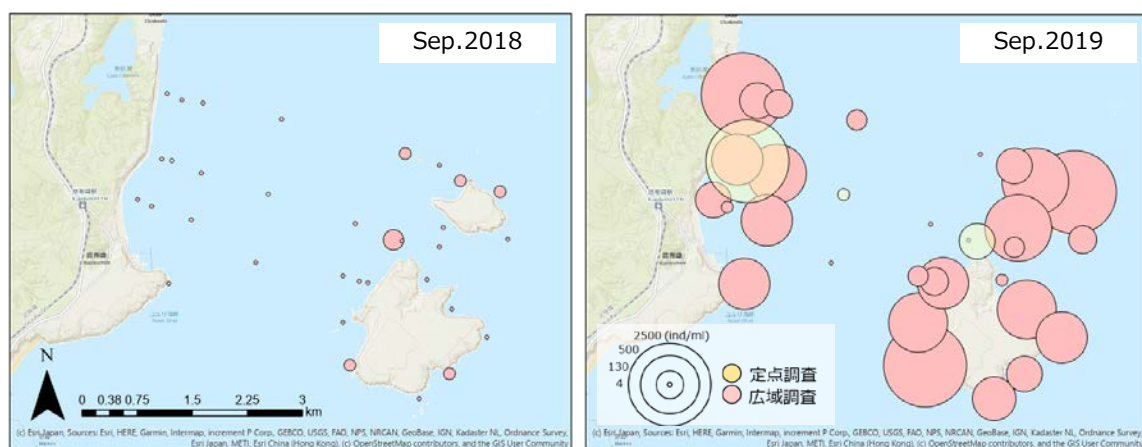
図イ-(ア)-3. St. A～C で採取した海水から出現したコンブ類の遊走子数(左軸、棒グラフ)とリアルタイムPCR分析で得られたコンブのDNA量(右軸、折れ線グラフ)

最盛期を的確にとらえられていたと考えられる。一方、ピークが一致しない地点・時期も確認された。培養法において孢子体の発生が確認されたにもかかわらず PCR 法によるナガコンブ DNA の検出量が少ない場合には、培養法で見られた個体がナガコンブ以外のコンブ類であった可能性がある。実際に、本研究の通気培養試験においても採取した海水にアイヌワカメの遊走子が含まれていたことが示された。逆に、ナガコンブ DNA が多く検出されているにもかかわらず培養法によりナガコンブの孢子体が検出できなかった場合、ろ過したフィルター上に付着していたコンブ以外の藻類との競合によりコンブの配偶体、幼孢子体の生育がうまくいかなかった可能性がある。

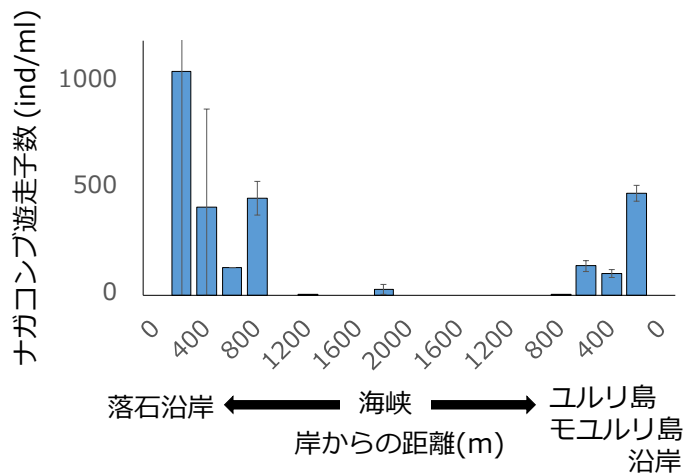
遊走子の空間分布

2018年9月18日と2019年9月11日に行った根室市落石沿岸の30地点でのPCR法により得られたナガコンブ遊走子数の推定値と、同時期の St. A、B、C の遊走子数の推定値を図イ-(ア)-4に示す。2018年は 6 ± 11 個/ml、2019年は 392 ± 487 個/mlと、遊走子数には年変動が認められた。落石沿岸やユルリ島・モユルリ島沿岸の岸沿いに多く分布し、両岸から2km程度離れた海峡部では少なくなっており(図イ-(ア)-5)、前項の St. A～Cでの分布傾向と類似していた。一方、100m程度しか離れていない場所間でも遊走子量が10倍以上も異なるなど、遊走子の分布は地点間で大きく異なっていた。遊走子の空間分布特性を把握するため、測定地点における岸からの距離、水深、流速と遊走子量を比較したが、相関は認められなかった。また、2010年におけるナガコンブ群落の分布域(北海道, 2010)を参考に、調査点から最も近い藻場までの距離と遊走子量の関係についても検討したが、相関は認められなかった。

本研究の結果から、遊走子は海峡で少なく、沿岸部に多く分布することが明らかになった。これは、遊走子の放出源となるコンブ群落が沿岸部に分布しているためと考えられる。したがって、コンブ漁場および生育の適地選定にあたっては、遊走子の放出源となるコンブ群落の分布と周辺海域における遊走子の量・分布との関係を把握することが重要となる。



図イ-(ア)-4. 調査海域におけるナガコンブ遊走子の分布。円の大きさは海水中の遊走子の数(ind/ml)を示す。左図が2018年9月18日、右図が2019年9月11日。黄色は定点調査、ピンク色は9月のみの広域調査。



図イ-(ア)-5. 離岸距離と DNA 量から推定したナガコンブ遊走子数（平均値±標準偏差）の関係。

【参考文献】

- 1) 名畑進一 (1989) コンブの遊走子の生態に関する研究(1) 第1報 コンブの遊走子の定量法. 北水試研報 32:11-17
- 2) 高谷義幸・秋野秀樹・四ツ倉典滋 (2016) リアルタイム PCR 法を用いたホソメコンブ遊走子の定量法 (技術報告). 北水試研報 90:13-16

(イ) 配偶体の受精および幼胞子体の成長と物理環境との関係解明

【方法】

1) 配偶体の成熟に対する栄養塩と流速の効果の検証

平成 30 年 8 月に根室市落石地先で成熟した子嚢班を持つナガコンブを潜水により採取し、新聞紙でくるみ冷蔵条件で稚内市の稚内水産試験場に輸送した。このナガコンブから子嚢班を切り取り、これを 5°C に冷却した滅菌海水中に置き、ナガコンブの遊走子を放出させた。遊走子の活力と濃度を顕微鏡下で確認し、遊走子を含む滅菌海水をシャーレ (φ90 mm) に滴下し、1~2 時間静置して遊走子を着生させた。このシャーレを 10°C、5 μmol/m²/sec、10L : 14D、栄養強化海水の環境下に置き、配偶体保存株を作成した。塊状に増えた配偶体をミキサーで粉碎して栄養塩強化した滅菌海水で適宜希釈し、18×24 mm のカバーガラスを配したシャーレに滴下した。このシャーレを 10°C、20 μmol/m²/sec、10L : 14D で培養し配偶体を着生させた。着生を顕微鏡下で確認した後これを試験に用いた。

水温 10°C に設定した水槽を 4 つに仕切り、出力の異なる水中ポンプを設置して流速を 30、15、5、0 cm/s に調整した実験区を設定した(図イ-(イ)-1)。各実験区に配偶体の着生したカバーガラスを設置し、光量 100 μmol/m²/sec、12L : 12D、硝酸態窒素濃度 5

μM で試験を開始した。培養開始後 12 日目に、カバーグラスを取り上げて実体顕微鏡下で配偶体を撮影し、配偶体の細胞の成熟状況を確認した。成熟して卵細胞になっている細胞と、未成熟の細胞を各試験区について計数した。各試験区における成熟・未成熟細胞の出現状況を目的変数、流速と栄養塩濃度を乗じたフラックス値を説明変数としてロジスティック曲線に当てはめ、成熟率が 50% となるフラックス値を求めた。

2) 幼胞子体の成長に対する流速の影響

上記 1) と同様の手順で作成した配偶体の付着したカバーグラスを 10°C、50 μmol/m²/sec、10L : 14D の条件下でさらに 10 日程度培養して、配偶体を成熟・受精させ、幼胞子体へと移行させた。

上記 1) と同様の装置 (図イ-(イ)-1) を用いて、流速 30、15、5、0 cm/s の実験区を設定した。各実験区に幼胞子体の着生したカバーグラスを設置し、光量 50 μmol/m²/sec、12L : 12D、硝酸態窒素濃度 10 μM の条件で飼育試験を実施した。培養開始時と開始後 8 日目に幼胞子体を実体顕微鏡下で撮影し、画像計測ソフトで幼胞子体の葉面積を求めた。面積から次式により相対成長速度を以下の式で実験区ごとに求めた。

$$RGR = (\ln(L_e) - \ln(L_s)) / d \quad (\text{mm}^2 / \text{mm}^2 / \text{day})$$

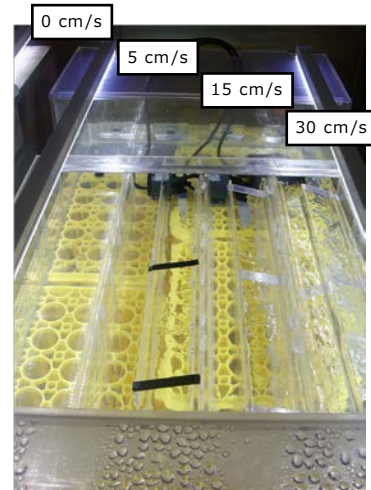
※ Le: 試験 8 日目のコンブの葉面積、Ls: 試験開始時のコンブの葉面積、
d: 培養日数、ln: 自然対数

培養流速と得られた相対成長速度を応答変数に回帰分析を行った。解析には R3.4.4 を利用した。

【結果と考察】

栄養塩フラックス値と配偶体成熟率の関係を図イ-(イ)-2 に示す。フラックス値の上昇とともに配偶体の成熟率は高まった。フラックス値が 0 でも成熟が認められる (成熟率 0.26) のは、栄養塩が流速に依らない拡散によって配偶体に供給されたためと考えられる。半数の配偶体が成熟するフラックス値は 34.7 であった。硝酸態窒素濃度を 5 μM に設定したので、このときの流速は 6.9 cm/s と推定された。

培養流速と幼胞子体の相対成長速度の関係を図イ-(イ)-3 に示す。ナガコンブの相対成長速度は 流速 15 cm/s で最大値を示した。流速による成長促進効果は、栄養塩フラックスの増大によるものと考えられる。コンブ幼胞子体の栄養塩吸収速度を上回るフラックスに達すると成長速度は飽和すると仮定し、得られた流速と相対成長速度の関係をミカエリス-メンテン式に回帰させた。その結果、相対成長速度の最大値 0.25、成



図イ-(イ)-1. 流速別培養試験装置

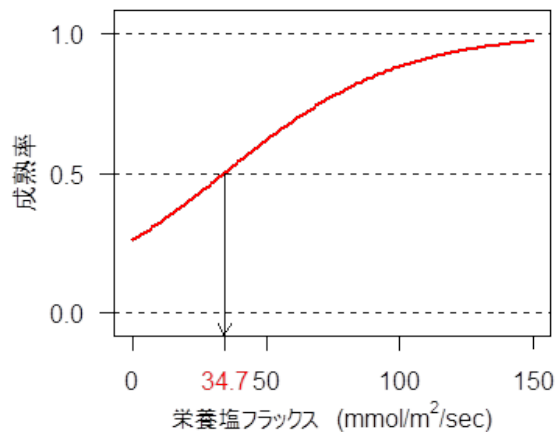
長速度が最大成長速度の 1/2 になる流速は 7.8 cm/s と求められた。

秋野 (2013) ¹⁾によれば、ホソメコンブ配偶体の成熟において、栄養塩濃度が異なっても流速との積であるフラックス値を用いることで結果の比較や数式化が可能であることから、栄養塩濃度の違いだけでなく流速を含めたフラックス値で栄養塩環境を評価することが重要である。二村ら (2006) ²⁾は、カジメ幼体とサガラメ幼体について海洋深層水と表層海水を用いて流速別に培養を行い、流速 9.4 cm/s の試験区で海洋深層水と表層海水の成長差がなくなる結果を得ている。また、馬場ら (2006) ³⁾は、5~50 cm/s の範囲でワカメを培養し、10~20 cm/s の範囲で葉面積の増大が著しいことを報告している。川井ら (2003) ⁴⁾では、実際の海域において流速環境の異なる地点に試験基質を設置し、平均流速 0.14 ~0.51 m/s の範囲内では流速が大きいほど着生した海藻類の現存量が増加した。

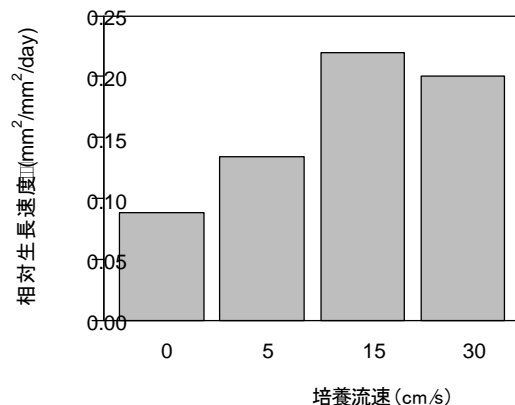
本試験の結果においては配偶体の成熟においては流速 6.9cm/s、幼胞子体の成長に対しては 15 cm/s を超えた程度で成長速度が頭打ちになったことから、微少な世代のナガコンブに対しては、流速 15cm/s 以上であれば初期成長に問題のない環境が整うと考えられた。しかし、幼胞子体以降の群落形成には川井らの結果が示唆するようにより大きな流速環境が必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) 秋野秀樹.(2013). 磯焼け海域におけるホソメコンブ群落形成を促す栄養塩類の種類と流速に関する研究 (経常研究).平成 24 年度道総研中央水産試験場事業報告書.
- 2) 二村和視, 岡本一利, & 高瀬進. (2006). 駿河湾深層水および表層海水中でのサガラメ・カジメ幼体の生長に及ぼす流速の影響. 海洋深層水研究, 7(2), 7-11.
- 3) 馬場将輔, 山本正之, & 渡辺幸彦. (2006). 流水式回流水槽によるワカメの水温と水流に対する生育反応. 海洋生物環境研究所研究報告, 9, 55-64.
- 4) 川井唯史, 金田友紀, & 桑原久実. (2003). ウニ侵入防止フェンス内におけるホソメコンブ群落に適する底面波浪平均流速とウニ類除去時期. 日本水産工学会誌, 39(3), 213-218.



図イ-(イ)-2. 栄養塩フラックス値と配偶体成熟率の関係



図イ-(イ)-3. 培養流速と幼胞子体の相対成長速度の関係

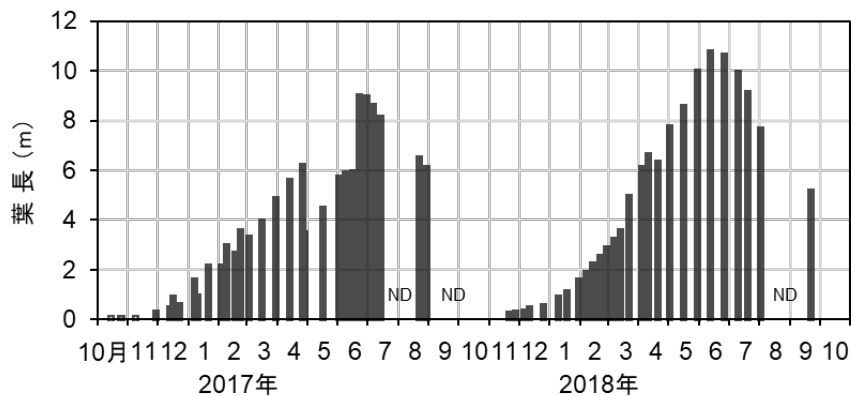
(ウ) 胞子体の成長・成熟と物理環境との関係性の推定

【方法】

コンブ胞子体の成長・成熟と海洋物理環境との関係性を把握するために、過年度の事業（平成 29,30 年度水産基盤整備調査委託事業「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発」）において実施した飼育試験のコンブの生育、環境に関するデータを整理・解析し、ナガコンブ胞子体の成長、成熟と水温、栄養塩、光量との関係性について検討した。時期毎にコンブ胞子体の生育に重要な役割を果たす環境要因を特定するとともに、下記「ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発」において実施する適地選定・評価手法開発に必要となるコンブ生育に関わる各種データの加工・調整および GIS に統合する上での諸条件を検討した。

【結果と考察】

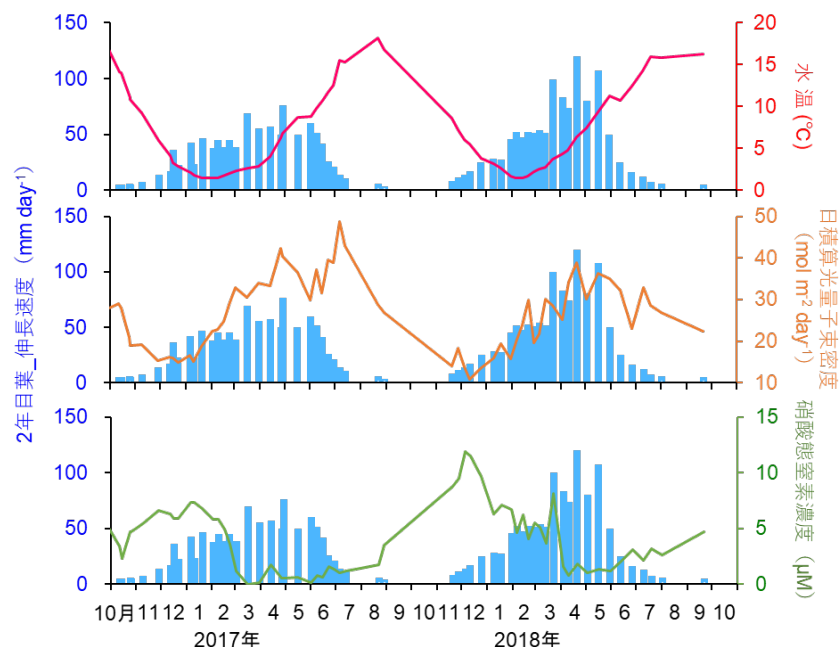
ナガコンブの 2 年目葉は、2017、2018 年には 10～11 月に伸長を開始（突き出し）し、翌年 6 月に最長となり、7 月以降は急速に葉長が短くなった（図イ-(ウ)-1）。一方、2 年目葉の成長（伸長）速度は、突き出し直後の 10～11 月は 10 mm day^{-1} であるが、その後翌年 3 月にかけて上昇し、3～6 月に最大（ $70\text{-}120 \text{ mm day}^{-1}$ ）に達した後、6 月以降になると急速に低下した（図イ-(ウ)-2）。



図イ-(ウ)-1. ナガコンブ（2年目）の葉長変化

飼育水槽内で観測した日積算光量子束密度は、12月に最低を記録し、1月に増加に転じ、5月に最大となった後は8月まで高水準を維持し、9月以降は徐々に減少した。海水温は、2月に最低になった後、3～4月に上昇に転じ、9月に最高に達した後、冬にかけて減少した（図イ-(ウ)-2）。飼育実験を行った釧路地先では、海水中の硝酸態窒素濃度は9月頃に上昇し始め、翌年3月までは高い水準を維持し、3～4月に濃度が急低下した後、春から夏（4～8月）にかけては低い水準で推移した（図イ-(ウ)-2）。1月から5月にかけての飼育水槽内でのナガコンブの成長速度の増加は、同期間の日積算光量子束密度の上昇と良く一致しており、コンブの成長速度が最大になる3～5月には日積算光量子束密度も最大となっていた。これらの結果から、同時期のナガコンブ葉状体（2年目葉）の成長速度は、光量により大きく影響されると考えられる。北海道の忍路湾に生育するホソメコンブについても、日射量の増加に伴い葉体の伸長成長量が増加することが報告されている¹⁾。マコンブ、ホソメコンブ、ミツイシコンブでは、葉体

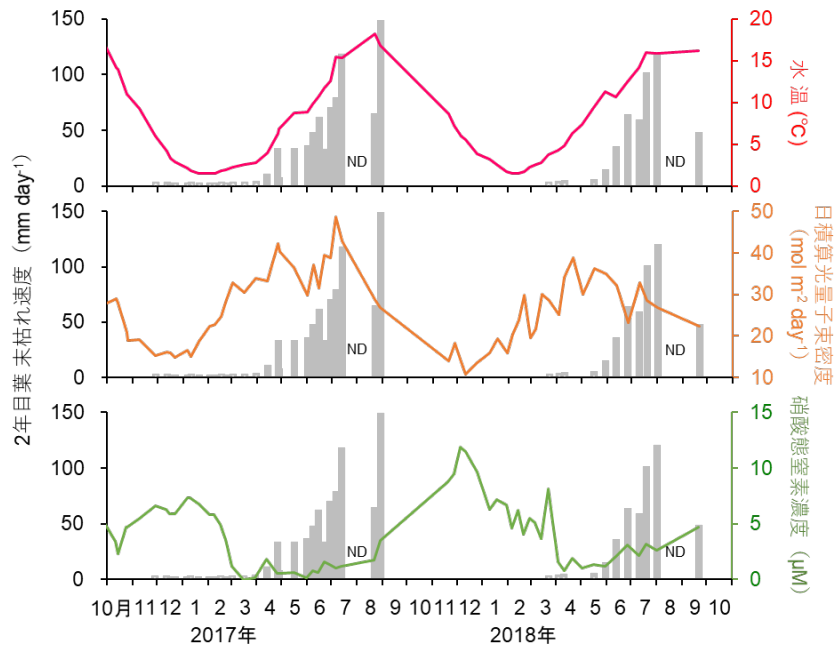
内に硝酸態窒素を高濃度で蓄積する²⁾(横山・三本菅 1979)。また、コンブ葉体内の硝酸態窒素濃度は海水中の濃度変化と密接に関連し、葉体内の硝酸態窒素濃度とコンブの成長との間には関連があることが示唆されている^{3), 4)}。飼育実験を行った釧路地先において、2017、2018年の4~5月は飼育海水中の硝酸態窒素濃度が年間最低水準であったが、両年ともにナガコンブの成長速度は年最大値を記録した。この結果は、秋季から冬季の硝酸態窒素濃度が高い時期にナガコンブが葉状体内に硝酸態窒素を蓄積し、海水中の硝酸態窒素濃度が低下した3~5月に成長に利用していることを示唆している。すなわち、1~5月のコンブの成長速度は、秋季から冬季にかけての栄養塩(窒素)の動態、水準に影響されると考えられる。3~4月の水温のパターンは両年で異なったが、水温とコンブの成長速度には明瞭な関係性は認められなかったことから、水温がコンブの成長に及ぼす影響はそれほど大きくはないと推察される。以上の結果から、ナガコンブの成長に影響を及ぼす環境条件は季節により異なり、前年11月から当年3月の栄養塩(窒素)の水準、当年1月から5月の光量が2年目の孢子体の成長に重要な役割を果たすことが明らかとなった。



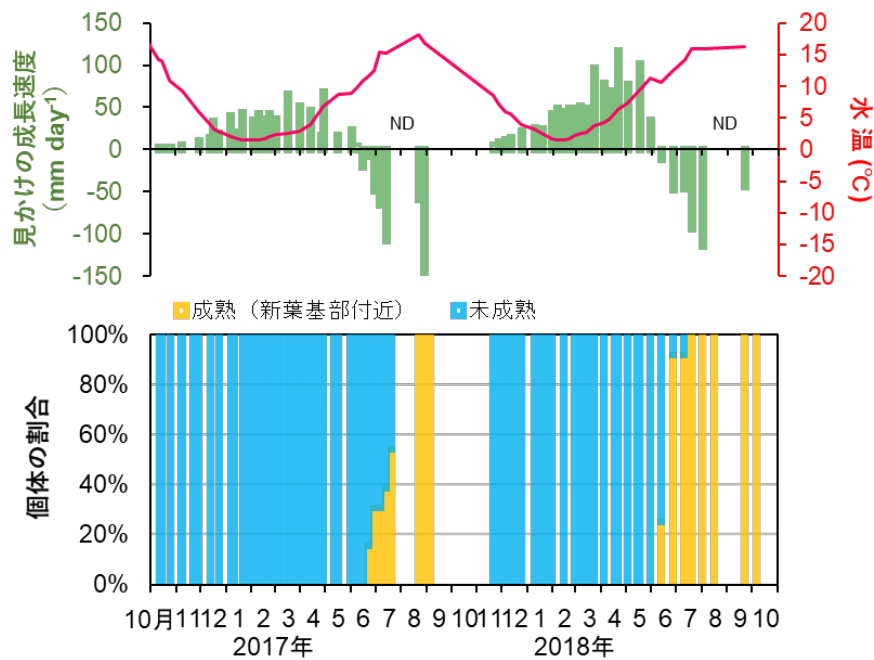
図イ-(ウ)-2. ナガコンブ(2年目)の伸長速度および飼育水槽内の水温、日積算光量子束密度、硝酸態窒素濃度の変化

2017、2018年ともに3~4月に周囲の海水中の硝酸態窒素濃度が低下した直後からナガコンブの末枯れが始まり、その後水温の上昇に伴い末枯れの速度が急速に上昇した(図イ-(ウ)-3)。末枯れの開始は、周囲の海水中の硝酸態窒素濃度の低下が引き金となり、その後の末枯れの進行速度は水温により影響されると考えられる。4月以降は、葉状体の伸長と同時に末枯れも進行するため、見かけの葉長、成長速度は両者の差し引きとなる。2年目葉の見かけの成長速度[見かけの成長速度=成長(伸長)速度-末枯れ速度]は、突き出し開始直後(10~11月)から4~5月にかけて上昇し、5月以降に減少し始め、6月にはマイナスに転じた(図イ-(ウ)-4)。2017、2018年ともに、水温が10°Cに到達する6月上旬~中旬にコンブの見かけの成長速度がマイナスに転じ、その

後は末枯れ速度の上昇に伴いマイナス幅が拡大した。見かけの成長速度がマイナスに転じるタイミングで成熟（子囊斑を形成）した個体が出現し、その後成熟個体の割合が急速に増加した（図イ-(ウ)-4）。これらの結果から、水温が 10°C に達するタイミングでコンブの成長速度が低下し始め、見かけの成長速度がマイナスに転じ、成熟へと向かうことが明らかとなった。



図イ-(ウ)-3. ナガコンブ（2年目）の末枯れ速度および飼育水槽内の水温、日積算光量子束密度、硝酸態窒素濃度の変化



図イ-(ウ)-4. ナガコンブ（2年目）の見かけの成長速度、成熟率の変化

【参考文献】

- 1) 阿部英治・垣内政宏・松山恵二・金子孝 (1983) 忍路湾のホソメコンブの生長と各種体内成分含有量の季節変化. 北海道水産試験場研究報告 25: 47-60
- 2) 横山雅仁・三本菅善昭 (1979) 促成コンブ葉体内における硝酸態窒素の時期的変化. 北海道区水産研究所研究報告 44: 67-72
- 3) Black W.A.P., Dewar E.T. (1949) Correlation of the physical and chemical properties of the sea with the chemical constitution of algae. J. Mar. Bio. Ass. U.K. 28: 673-699
- 4) Chapman A.R.O. and Craigie J.S. (1977) Seasonal growth in *Laminaria longicuris*: Relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen. Mar. Biol. 40: 197-205

(エ) コンブの生息環境条件の推定

- 1) コンブ類の分布と物理的環境要因との関係 (釧路水産試験場、中央水産試験場)

【方法】

コンブ類の分布情報と地形データの収集および整理

根室市落石沿岸におけるコンブ類の分布情報を整理し、北海道東部太平洋沿岸における主要な漁獲対象種であるナガコンブ、ガツガラコンブ、ネコアシコンブならびにオニコンブの分布域をマッピングした。GIS ソフト (QGIS 2.18.22, ArcGIS Pro) を用いて、根室市落石沿岸海域を 100×100 m のグリッドに分け、各グリッドに底質 (北海道立地質研究所 2009)、水深(m)、傾斜角(°)、傾斜方位(°)の情報を入力した。また、北海道が作製したコンブ類分布図 (北海道 2010) を GIS データとして取り込み、上記同様のグリッドにコンブ類各種の分布の有無を入力した。

物理環境情報の収集および整理

コンブ類分布域の物理環境を明らかにするために、海底面における光合成有効放射量、底面流速、栄養塩フラックスを演算した。Web 上に公開されている人工衛星観測データ (海面の光合成有効放射量) を取得した。さらに、上記の課題イ-(ア)で観測した深度別の光量子束密度のデータから海水中における吸光係数を算出し、海面の光合成有効放射量と吸光係数から海底面における光合成有効放射量を推定した。コンブの栄養塩吸収・利用は、海水中の栄養塩濃度と海底付近の流況の両方に影響される。そのため、コンブ生育に対する栄養塩の動態はフラックス (栄養塩濃度に底面流速を乗じた値) として考慮する必要がある。釧路港で観測されている波高、周期ならびに波向データと根室市落石沿岸の水深データから、根室市落石沿岸の底面流速を算出した。落石沿岸海域で取得した硝酸態窒素濃度(μM、課題イ-(ア)の St. A、B、C の平均値)と各地点の底面流速から栄養塩フラックス値を算出した。これらの推定値をグリッド毎に平均して入力し、コンブ類の分布と比較できる形式に整理した。各データは、2017年11月のものを用いた。前項で整備した底質データからコンブ類が生育する水深 20 m 以浅かつ底質が岩の海域を抽出し、物理環境データとコンブ類の分布データを重ね合わせ、コンブ類の分布域における各物理環境とコンブ類の分布の有無の関係を種類毎に求めた。コンブ類の分布が認められたグリッド数を総グリッド数で除した値を各種コンブ

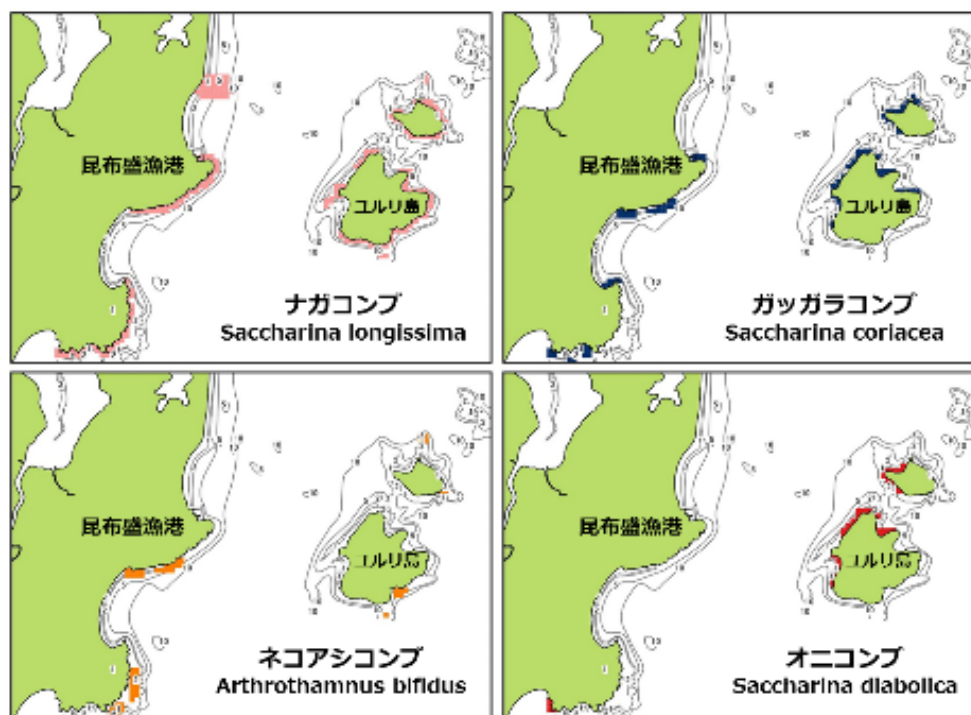
類の出現率とし、物理環境データの階級毎に出現率を算出した

【結果と考察】

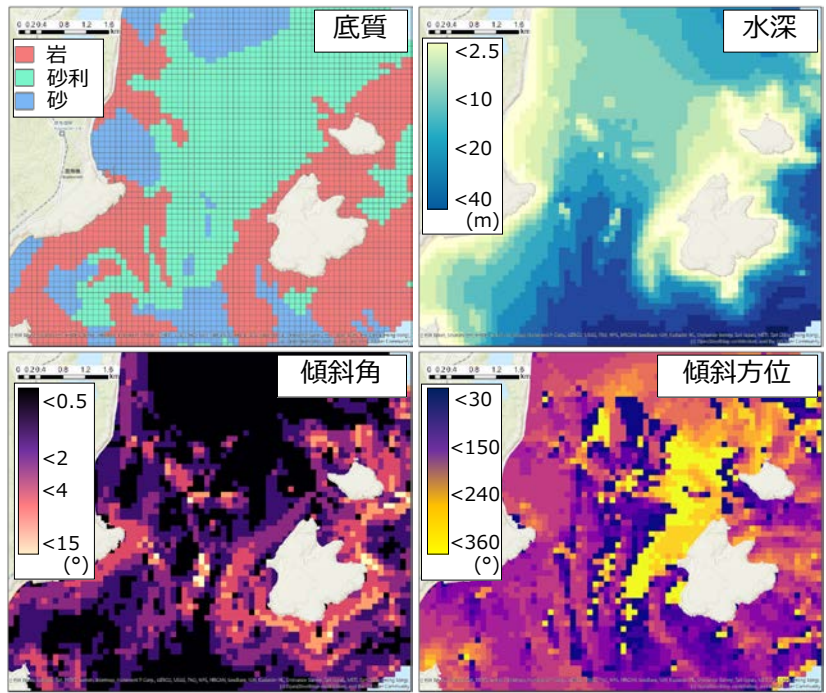
コンブ類の分布情報と地形データの収集および整理

調査海域である根室市落石沿岸の主要な漁獲対象種であるコンブ類 4 種の分布域を図イ-(エ)-1 に示す。調査海域においては、ナガコンブ、ガッガラコンブ、ネコアシコンブならびにオニコンブが漁獲対象であり、種により分布域が異なっていた。

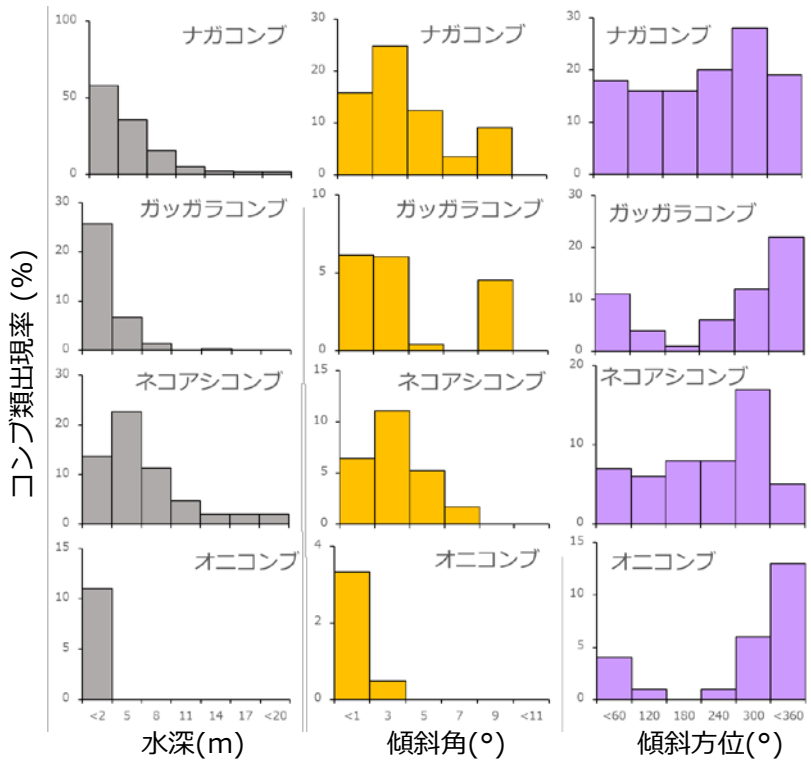
図イ-(エ)-2 に、調査海域の底質分布、水深、傾斜角、傾斜方位をマッピングしたものを示す。調査海域の底質は主に岩、砂利、砂だった。コンブ類は岩を基質とするため、底質が岩であるグリッドを適地とした。水深、傾斜角、傾斜方位の階級ごとのコンブ類の出現率のヒストグラムを図イ-(エ)-3 に示す。各コンブ種が出現した水深(図イ-(エ)-3 左)は、ナガコンブとガッガラコンブ、オニコンブで 2 m 以浅が最も多くなり、ネコアシコンブでは水深 5 m 付近に多く出現していた。ナガコンブとネコアシコンブは水深 20 m 付近の深場まで出現していた。各コンブ種が出現した場所の傾斜角(図イ-(エ)-3 中)について、オニコンブは 1° 以下のほとんど傾斜の無い平坦な場所でも出現していた。各コンブ種が出現した場所の傾斜方位(図イ-(エ)-3 右)について、ナガコンブとネコアシコンブでは傾斜方位 240~300°の北東~南東方向に面した海域をピークとして満遍なく出現していたが、ガッガラコンブとオニコンブでは 300~360°の南東方向がピークである一方、北向きの海域になるにつれて出現率が減少していた。



図イ-(エ)-1. 根室市落石沿岸におけるコンブ類4種の分布図(100mグリッド)。



図イ-(エ)-2. 根室市落石沿岸における海底地形データ。
 左上：底質、右上：水深、左下：傾斜角、右下：傾斜方位を示す。

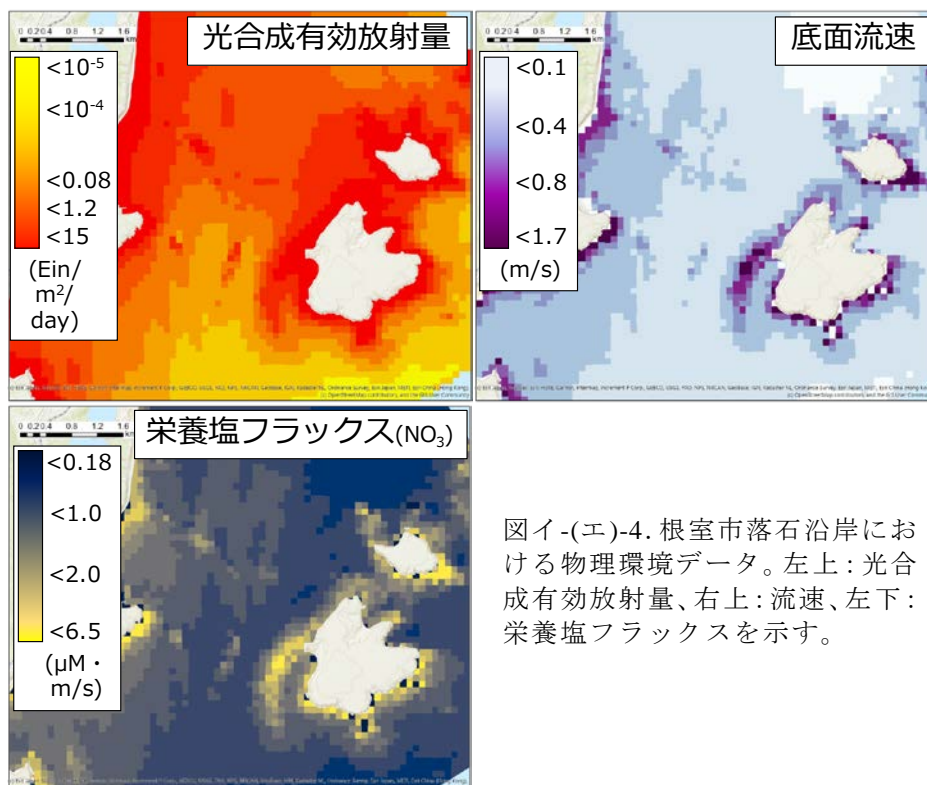


図イ-(エ)-3. 海底地形データとコンブ類4種の出現率。縦軸はコンブ類出現率、横軸は左図から水深、傾斜角、傾斜方位。

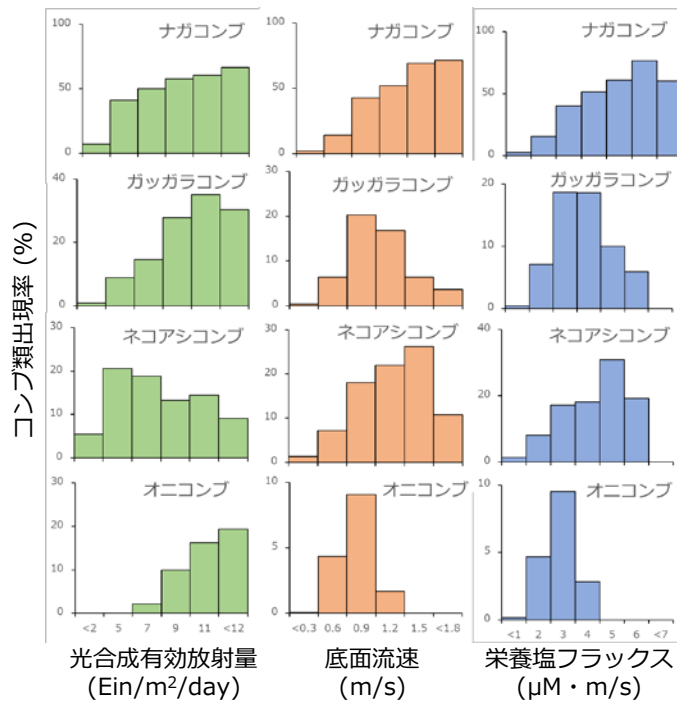
物理環境情報の収集および整理

調査海域における 2017 年 11 月の光合成有効放射量と底面流速と栄養塩フラックスを推定したマップを図イ-(エ)-4 に示す。ここから得られた光合成有効放射量、底面流速、栄養塩フラックスの階級ごとのコンブ類の出現率のヒストグラムを図イ-(エ)-5 に示す。光合成有効放射量からは、ガッガラコンブとオニココンブは高光量域（10～12 Ein/m²/day）で出現率が高かったことが示された。ナガコンブの出現率も上記 2 種と同様に高光量域で高かったが、約 2～8 Ein/m²/day でも比較的高かった。ネコアシコンブの出現率は低光量域（2～4 Ein/m²/day）で高く、他の 3 種と明らかに異なっていた（図イ-(エ)-5 左）。底面流速からは、ナガコンブとネコアシコンブが高流速域（0.6 m～0.7 m/s）で出現率が高かったのに対し、ガッガラコンブは 0.4～0.5 m/s、オニココンブは 0.3～0.4 m/s と低流速域で高かったことが示された。また、栄養塩フラックスからは、ナガコンブ、ガッガラコンブ、オニココンブで底面流速と類似した傾向が見られた。一方、ネコアシコンブでは栄養塩フラックスが 4～5 μM/m²/s の海域で出現率が突出して高くなっていた。

根室市沿岸における主要なコンブ類が生育する地形や物理環境要因は、種により大きく異なることが明らかとなった。収集・整理したこれらのデータは、コンブ漁場造成の適地選定にも活用できると考えられる。



図イ-(エ)-4. 根室市落石沿岸における物理環境データ。左上：光合成有効放射量、右上：流速、左下：栄養塩フラックスを示す。



図イ-(エ)-5. 物理環境データとコンブ類 4 種の出現率。縦軸はコンブ類出現率、横軸は左図から光合成有効放射量、底面流速、栄養塩フラックス。

2) コンブの生育差と物理的環境要因

【方法】

モデル海域におけるナガコンブの漁場カテゴリー分けの精度の確認

平成 30 年度当該事業において、ナガコンブの生育形質を「コンブの長さ」として歯舞及び落石地区の計 58 漁場をコンブ生育の良好な漁場（高生育漁場：C1）とコンブ生育が良好でない漁場（低生育漁場：C2）の 2 つのカテゴリーに分類した。これらのカテゴリーがモデル海域である落石地区 23 漁場について正しく分類されているか否かを確認するために、判別分析を行った。コンブの全平均全長、平均順位ポイント（コンブ平均全長の漁場間順位/調査漁場数の平成 18 年～平成 28 年までの平均値）及びその標準偏差を共変量として 2 つの漁場カテゴリーを識別し、その誤判別率を確認した。

ナガコンブ漁場の物理的環境要因に関するデータの収集及び算出

ナガコンブの生育に関わる漁場の主要な物理的環境要因として水深、底質、傾斜度、最大傾斜度、底面流速、栄養塩フラックス及び光合成有効放射量の 7 つの要因について検討を行った。前年度同様、空間解析には地理情報システム（ArcGIS10、以下 GIS）を用い、漁場の広がり 500 m とし、十分な漁場数を確保するためにモデル海域である落石地区に新たに歯舞地区を加えて分析を行った。漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度及び最大傾斜度については、前年度同様、空間解析により計算された。なお、底質については、前年度同様、砂質を 1、礫質を 2、そして岩盤質を 3 とスコアを与え、解析を行った。

底面流速を計算するにあたり、海底地形データとして日本水路協会 M7000 シリーズを、沖波条件データとして国土交通省港湾局ナウファスの有義波の月平均値（2017年9月～2018年8月の波高、周期、波向き）を準備し、3次元流動モデル Delft3D を用いて波動解析を行い、研究対象海域の底面流速を 30 m メッシュレベルで算出した。その結果に基づき、GIS による空間解析によりラスターデータへの空間補完及びデータ抽出を行うことで漁場の平均底面流速を算出した。

イ-(ウ)の結果、コンブ生育に 11 月から 3 月の栄養塩濃度が重要な役割を果たすことが示された。落石及び歯舞地区には、上記アにおいて栄養塩のモニタリングを実施した地点が一ヶ所ずつあり、1～2 週間隔で栄養塩濃度が測定されている。「月別栄養塩フラックス ($\text{mmol/m}^2/\text{month}$) (積算値)」を「月別平均栄養塩濃度 ($\mu\text{mol/L}$) × 月平均底面流速 (m/s) × 86,400 秒 × 月日数」の式で定義し、モニタリング地点の月別平均栄養塩濃度 (NO_3+NO_2) (2014 年～2018 年) のデータと底面流速データを用いて、上記の底面流速を計算した 30 m メッシュポイント上の「月別栄養塩フラックス (積算値)」を計算した。さらにこの値を 11 月～3 月まで積算することで、そのメッシュポイント上の「積算栄養塩フラックス (11 月～3 月)」を算出した。その後、底面流速と同様に空間解析によって漁場の積算栄養塩フラックス (11 月～3 月) を導き出した。

イ-(ウ)の結果、1 月から 5 月にかけての光環境はナガコンブの生育に大きな影響を与えていることが示された。漁場の底面の光強度を計算するために、地球観測衛星 NPP の海色データから作成されたプロダクトを海表面に降り注ぐ光合成有効放射量として対象地域を 4 km メッシュ・月平均で切り出し、データソースとして利用した。さらに、底面の光強度を計算するためには水深に応じた吸光係数の算出が不可欠である。落石地区では、2016 年から月に一回 5 地点で光量子計の付属する測器を用いたモニタリング調査が行われている。そのデータを用いて坂西ほか(2001)¹⁾を参考に、水深と光量子量の関係を指数関数で近似させ、吸光係数 k を導いた。相関係数 (R^2) が 0.9 以上の関係式から導き出された吸光係数を採用し、2016 年から 2019 年まで 5 地点の吸光係数を月別で平均した。1 月の吸光係数(k)は 0.37、2 月は 0.38、3 月は 0.62、4 月は 0.55、5 月は 0.36 として底面光強度の計算に利用した。上記の 4 km メッシュポイントにおいて GIS により水深の値を抽出し、衛星データから計算された光合成有効放射量を海面の光強度として、坂西ほか(2001)¹⁾による光強度の計算式 [$I_D=I_0 \exp(-k D)$; I_D : 水深 D での光強度、 I_0 : 海面の光強度、 k : 吸光係数]にもとづいて海底面の光強度を計算した。その値に月日数をかけて月別積算底面光強度を算出し、その値を 1 月から 5 月まで合計したものを積算底面光強度 (1 月～5 月) とし、1 月から 5 月にかけての海底面の光環境の指標とした。空間解析によってラスターデータへ空間補完し、データ抽出を行うことで漁場の積算底面光強度 (1 月～5 月) を導き出した。

ナガコンブの生育に関わる物理的環境要因の検討

2 つの漁場カテゴリー間での物理的環境要因の違いを把握するために、漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度、平均底面流速、積算栄養塩フラックス (11 月～3 月) 及び積算底面光強度 (1 月～5 月) について t-test を用いて漁場間で比較検定を行った。

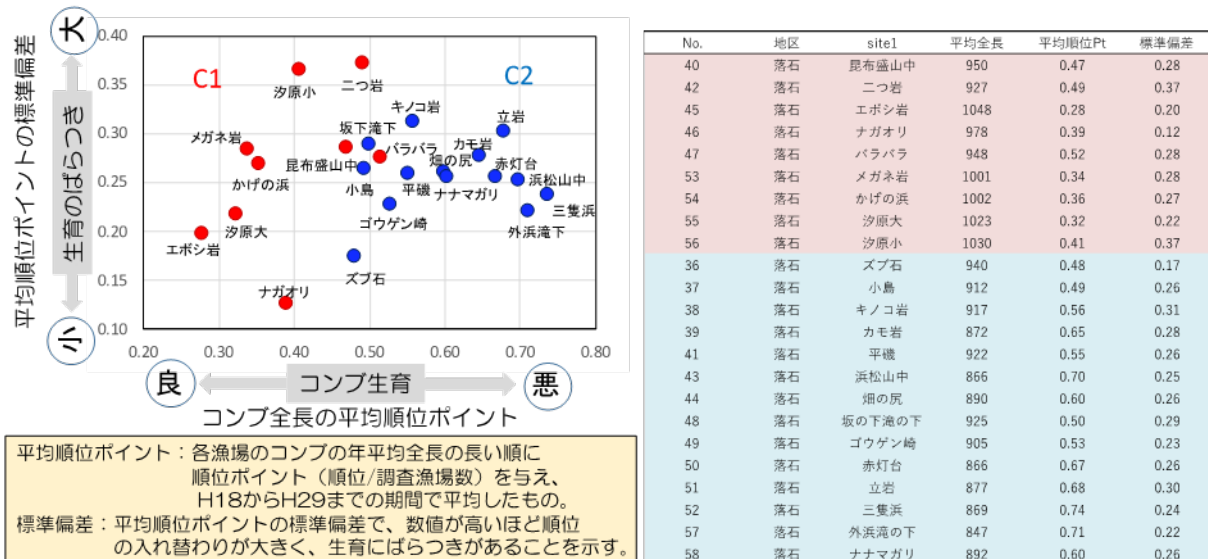
漁場カテゴリーの決定要因を総合的に評価するため、漁場カテゴリーを目的変数に、漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均底面流速の 5 変数を説明変数としてロジスティック回帰分析を行った。なお、積算栄養塩フラックス (11 月

～3月)及び積算底面光強度(1月～5月)には平均底面流速と平均水深の情報が多く含まれ、多重共線性が見られるため、説明変数として利用しなかった。さらに、漁場カテゴリーを各説明変数で分類する際の閾値を探るために、漁場カテゴリーを目的変数に、平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均底面流速の5変数を説明変数として決定木分析を行った。

【結果と考察】

モデル海域におけるナガコンブの漁場カテゴリー分け

昨年度の解析において落石地区23漁場のうち、高生育漁場(C1)として分類された漁場は昆布盛山中、二ツ岩、エボシ岩、ナガオリ、バラバラ、メガネ岩、かげの浜、汐原大及び汐原小の9漁場、低生育漁場(C2)として分類された漁場はズブ石、小島、キノコ岩、カモ岩、平磯、浜松山中、畑の尻、坂の下滝の下、ゴウゲン崎、赤灯台、立岩、三隻浜、外浜滝の下及びナナマガリの14漁場、これらをコンブの全平均全長、平均順位ポイント及びその標準偏差の3変数によって、判別したところ正確に2つの漁場カテゴリーに分類することができた(Wilks λ =0.30, P<0.001, 誤判別率は0%, 図イ-(エ)-6)。また、C1のコンブの全平均全長(990 cm \pm 42 SD)はC2のそれよりも長く(893 cm \pm 28 SD; t-test, t=-6.7, P<0.001)、C1の平均順位ポイント(0.40 \pm 0.08 SD)はC2のそれよりも低かった(0.60 \pm 0.09 SD; t-test, t=5.7, P<0.001)。しかし、平均順位ポイントのばらつきについてはC1(0.27 \pm 0.08 SD)とC2(0.26 \pm 0.03 SD)の間で差は見られなかった(t-test, t=-0.4, P=0.69)。これら結果は、昨年度行った漁場のカテゴリー分けの妥当性を示している。今年度、モデル海域である落石地区について当初の予定どおり、昨年度の成果も踏襲しながら解析を進めるものとする。



図イ-(エ)-6. コンブの平均順位ポイントとその標準偏差との関係。
 クラスタ分析によりコンブの平均全長、平均順位ポイント及びその標準偏差から2つの漁場カテゴリーに分類した。赤丸・枠は高生育漁場、青丸・枠は低生育漁場と判断された。

ナガコンブの生育に関わる物理的環境要因

落石・歯舞地区の計 58 コンブ漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度、平均底面流速、積算栄養塩フラックス (11 月～3 月) 及び積算底面光強度 (1 月～5 月) を表イ-(エ)-1 にまとめた。58 コンブ漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均底面流速から、ナガコンブ漁場の成立条件はおよそ平均水深 8 m 以浅、底質 2 以上、平均傾斜度 4°未満、最大傾斜度 40°未満及び平均底面流速 30cm/s 以上 85cm/s 未満であると考えられた。

高生育漁場 (C1) と低生育漁場 (C2) の間で物理的環境要因を比較した結果、C1 は C2 よりも平均底面流速が早く、積算栄養塩フラックス (11 月～3 月) が高いことが示された(表イ-(エ)-2)。しかし、平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均積算底面光強度 (1 月～5 月) の 5 つの変数については漁場カテゴリー間で有意な差は見られなかった (表イ-(エ)-2)。また、ロジスティック回帰分析の結果、漁場カテゴリー間の違いを説明する変数として平均底面流速のみが有意であった (表イ-(エ)-3)。これらの結果から、ナガコンブの生育に関わる漁場の環境要因として栄養塩供給などに関わる潮流の速さや波あたりの強さが重要であると考えられた。

表イ-(エ)-1. 歯舞地区及び落石地区漁場一覧及び各漁場環境要因。
底質は数値が大きいほど岩盤質、小さいほど砂質となる。

Site No.	Site	area	平均水深	平均傾斜度	最大傾斜度	平均底質	平均底面流速	積算栄養塩フラックス(11～3月)	積算底面光強度(1～5月)
			(m)	(°)	(°)	(1.2.3)	(cm/s)	(10 ² mol/m ² /month)	(E/m ² /month)
			Mean	Mean	-	Mean	Mean	Mean	Mean
1	乱橋	歯舞	5.5	2.1	12.9	3.0	57.0	31.8	521.9
2	田中	歯舞	4.2	1.0	8.2	3.0	64.3	35.4	706.0
3	取戸石	歯舞	3.3	0.3	3.6	3.0	72.1	38.9	932.0
4	ヤマニ	歯舞	3.8	2.3	14.0	3.0	68.4	37.9	981.0
5	立野	歯舞	1.8	0.7	6.0	3.0	74.7	41.7	1865.1
6	カブ島	歯舞	1.9	1.2	22.3	3.0	81.2	46.8	1874.9
7	走りスズ	歯舞	1.5	0.4	3.7	2.1	74.9	42.6	2078.8
8	ガッパ歯舞	歯舞	3.6	0.8	5.9	3.0	72.2	38.3	954.1
9	戸田	歯舞	1.7	0.5	3.6	3.0	75.6	42.1	1972.2
10	シンロク	歯舞	4.3	2.5	15.6	3.0	75.7	42.2	898.9
11	中の瀬歯舞	歯舞	2.2	0.8	6.5	3.0	56.4	31.1	1583.5
12	桜井スズ	歯舞	2.8	0.9	14.8	3.0	47.8	26.7	1288.9
13	屋根ヤ	歯舞	3.3	2.1	15.4	3.0	69.7	39.8	1317.8
14	7枚オリ	歯舞	4.8	0.8	10.7	3.0	54.0	31.1	513.7
15	ボンコタン	歯舞	3.9	1.2	9.0	3.0	68.0	39.1	1067.4
16	マッカ岩東	歯舞	1.4	0.5	7.2	2.9	74.2	42.8	2241.2
17	マッカ岩西	歯舞	2.3	0.8	5.2	1.9	82.6	47.1	1585.0
18	工藤の瀬	歯舞	1.3	0.3	3.3	1.1	56.2	32.6	2273.9
19	木村	歯舞	4.6	2.2	13.9	2.9	66.6	37.6	946.2
20	工藤の岬	歯舞	7.6	4.0	18.4	3.0	53.3	30.2	546.1
21	三上	歯舞	2.5	1.0	8.3	2.3	76.1	44.2	1495.5
22	沖根辺川	歯舞	2.1	0.9	8.0	2.5	69.2	39.6	1700.6
23	マルスの瀬	歯舞	1.8	0.8	4.6	2.9	72.8	41.1	1967.8
24	マンジュウ岩	歯舞	3.5	1.8	11.6	3.0	67.2	37.9	1217.3
25	ヨコオリ	歯舞	1.5	0.6	4.1	3.0	56.9	33.3	2070.0
26	早勢の瀬	歯舞	2.1	0.6	3.5	3.0	70.0	40.3	1708.3
27	共和小学校	歯舞	2.0	0.8	5.5	3.0	63.7	35.8	1835.5
28	クロサウ	歯舞	2.3	1.1	9.3	3.0	58.8	32.2	1649.8
29	オッキイ浜	歯舞	4.5	2.9	17.5	2.5	52.5	28.5	1108.4
30	上野	歯舞	1.8	0.8	4.6	2.9	51.0	29.5	1886.0
31	ゴメ島友知	歯舞	4.3	3.2	16.0	3.0	59.4	32.6	1021.2
32	ヘロ瀬	歯舞	2.1	1.2	9.2	3.0	47.8	26.1	1748.4
33	ドンジャ島	歯舞	2.9	2.2	16.8	3.0	56.8	31.4	1475.5
34	ナヤバ	歯舞	2.1	1.4	7.6	3.0	32.2	18.2	1734.6
35	サラシ	歯舞	6.1	2.6	19.3	2.7	32.0	18.5	922.4
36	スズ石	落石	2.2	1.0	7.6	2.3	58.2	44.2	1683.0
37	小島	落石	3.3	1.2	17.1	2.7	30.7	22.9	1155.6
38	キノコ岩	落石	3.3	2.0	15.5	2.7	35.2	24.0	1296.6
39	カモ岩	落石	5.1	3.7	34.6	2.9	31.1	20.6	1000.7
40	昆布盛山中	落石	5.8	3.4	34.4	3.0	56.0	41.3	776.1
41	平磯	落石	2.4	1.2	9.5	3.0	57.7	44.3	1561.6
42	二つ岩	落石	4.4	2.2	15.4	3.0	49.3	38.4	701.8
43	浜松山中	落石	4.4	2.1	15.1	3.0	65.7	47.2	858.8
44	畑の尻	落石	4.6	2.3	11.2	3.0	47.0	31.9	840.7
45	エボシ岩	落石	3.8	2.8	25.9	3.0	53.1	37.9	1191.6
46	ナガオリ	落石	2.7	1.4	12.2	3.0	66.6	49.2	1500.6
47	バラバラ	落石	4.4	2.6	19.1	3.0	69.7	50.9	936.1
48	坂の下滝の下	落石	2.9	1.8	10.7	3.0	67.0	47.6	1357.9
49	ゴウゲン岬	落石	3.3	2.6	28.5	3.0	73.2	52.6	1251.1
50	赤灯台	落石	4.4	2.9	34.9	2.8	43.8	30.7	954.7
51	立岩	落石	4.5	2.0	24.3	2.9	42.3	29.2	800.1
52	三隻浜	落石	3.1	0.2	2.3	3.0	56.3	38.3	984.0
53	メガネ岩	落石	5.7	2.8	30.8	3.0	46.3	31.2	542.3
54	かげの浜	落石	3.2	0.3	2.1	3.0	50.7	33.6	955.4
55	汐原大	落石	5.4	2.1	31.6	3.0	70.1	50.7	546.9
56	汐原小	落石	3.7	1.8	37.6	3.0	70.2	50.6	887.9
57	外浜滝の下	落石	2.1	1.6	15.3	3.0	32.8	26.6	1840.9
58	オナマガリ	落石	7.9	3.7	23.9	2.9	40.7	30.6	421.0

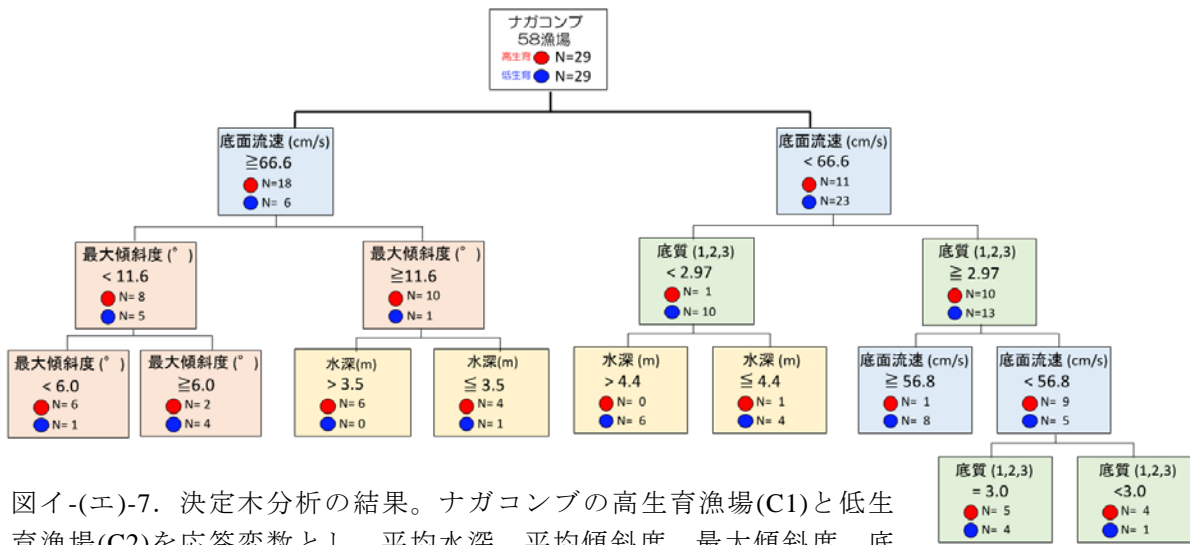
決定木分析の結果、漁場カテゴリーを平均底面流速、平均底質、最大傾斜度及び平均水深により分割することができた (図イ-(エ)-7)。この結果もまた平均底面流速の一義的な重要性を示している。この決定木から、C1 及び C2 の漁場条件を読み取った。その結果、C1 となる条件は3つでそれぞれ高生育条件 1、条件 2、そして条件 3 とした (図イ-(エ)-8)。一方、C2 となる条件も同じく3つでそれぞれ低生育条件 1、条件 2そして条件 3 とした (図イ-(エ)-8)。なお、C1 と C2 どちらにもなりうる環境条件は、平均底面流速が 56.8cm/s 未満で平均底質は 3.00 であり、中立生育条件 1 とした。この条件分けによって計 58 漁場のうち 51 漁場(87.8%)を説明することができた。ナガコンブの生育可能条件、その中での高生育条件、低生育条件そして中立成立条件の閾値について表イ-(エ)-4 にまとめた。

表イ-(エ)-2. One way-ANOVA による海底構造に関わる 7 変数のカテゴリー間比較。

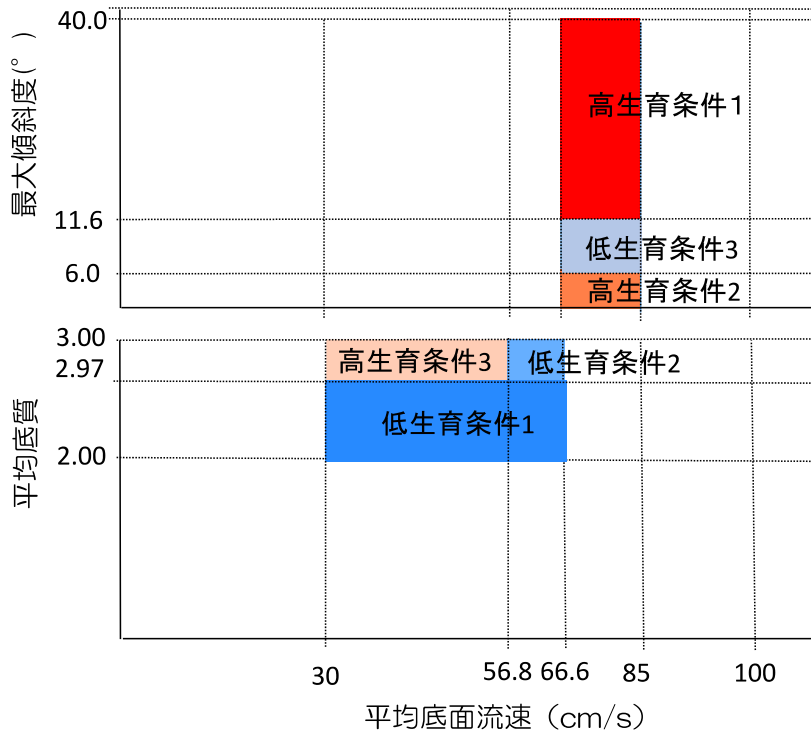
Variables	高生育漁場(C1) (n=29)	低生育漁場(C2) (n=29)	t	P
	Mean (SD)	Mean (SD)		
平均水深(m)	3.3 (1.3)	3.6 (1.7)	-0.5	0.601
積算底面光強度(1-5月) (E/m ² /month)	1261.6 (495.1)	1281.0 (499.6)	0.1	0.882
平均傾斜度(°)	1.5 (0.9)	1.7 (1.1)	0.8	0.412
最大傾斜度(°)	14.1 (9.9)	13.6 (8.9)	-0.2	0.839
平均底質(1,2,3)	2.9 (0.3)	2.8 (0.4)	-0.7	0.516
年平均流速(cm/sec)	64.0 (12.0)	54.1 (13.6)	-2.9	0.005
積算栄養塩フラックス(11-3月) (10 ³ mol/m ² /month)	38.8 (7.7)	34.3 (8.5)	-2.2	0.036

表イ-(エ)-3. ロジスティック回帰分析の結果。漁場カテゴリーを応答変数、5つの漁場環境要因を説明変数として漁場カテゴリーの決定要因を解析

応答変数	説明変数	df	加2乗	R2乗	尤度比加2乗	P
漁場カテゴリー (高生育漁場C1・低生育漁場C2)		5	11.6	0.14		0.041
	平均水深				0.18	0.670
	平均傾斜度				1.54	0.215
	最大傾斜度				2.42	0.120
	平均底質				0.56	0.455
	平均底面流速				8.24	0.004



図イ-(エ)-7. 決定木分析の結果。ナガコンプの高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)を応答変数とし、平均水深、平均傾斜度、最大傾斜度、底質及び年平均流速の5つの変数を説明変数として、応答変数を説明変数で有意水準に基づいて分岐させた。



図イ-(エ)-8. 決定木分析の結果から読み取った高生育漁場になるための3つの条件。赤色系の枠は高生育条件に当てはまる範囲を示し、青色系の枠は低生育条件の範囲を示す。

表イ-(エ)-4. コンプの漁場ポテンシャルに対する環境条件とその閾値。

	底面流速(cm/s)	底質(1,2,3)	最大傾斜度(°)	傾斜度(°)	水深(m)
ナガコンプ生育可能条件					
条件1	30.0-85.0	2.00-3.00	0-40.0	0-4.0	0-8.0
ナガコンプ高生育条件					
条件1	66.6以上	-	11.6以上	-	-
条件2	66.6以上	-	6.0未満	-	-
条件3	56.8未満	2.97以上3.00未満	-	-	-
ナガコンプ低生育条件					
条件1	66.6未満	2.97未満	-	-	-
条件2	56.8以上66.6未満	2.97以上	-	-	-
条件3	66.6以上	-	6.0以上11.6未満	-	-
ナガコンプ中立生育条件					
条件1	56.8未満	3.00	-	-	-

【参考文献】

- 1) 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川徹・飯泉仁・山本正昭 (2001) ナガコンプの光合成及び生産力と関連した水中の光環境について.藻類 49: 117-123.

ウ. GIS を使った適地選定・評価手法の開発

【目的】

物理環境、コンブ漁場に関するデータおよび上記ア、イの成果・データを GIS に取り込み、コンブ漁場適地選定・評価手法を開発する。根室市落石地区をモデル海域として、環境データとコンブ類 4 種の出現率の関係（イ-(エ)の成果）を集約し、GIS によりコンブ類の分布ポテンシャルマップを作成する。ナガコンブの配偶体の成熟率および幼胞子体の相対成長速度と各環境データとの関係式（イ-(イ)の本年度および過年度の成果）から、相対成長速度および配偶体成熟率のポテンシャルマップを作成する。大型胞子体の生育環境条件（イ-(エ)の成果）にもとづき、ナガコンブ胞子体の生育ポテンシャルに関する漁場マップを作成する。これにより各生育段階におけるコンブの生育適地選定・評価を可能とする。

【方法】

地形・物理環境に沿ったコンブ類の分布ポテンシャルマップの作成

課題イ(エ)において落石沿岸海域のモユルリ島周辺についてコンブ類の分布域と地形データ・物理環境データを用いて、100×100 m グリッド内の各環境要因におけるコンブ類の出現率(%)を GIS 上にマッピングした。地形・物理環境それぞれのデータを集約し、各コンブ類が分布する可能性を 1%以上有する分布のポテンシャルを示した海域を GIS 上にマッピングし、コンブ類の分布ポテンシャルマップを作成した。

配偶体の成熟ポテンシャルマップの作成

落石海域をグリッドに分割し、各環境要因のラスターデータをポイントデータに変換し、グリッド内の底面流速、光合成有効放射量（海底面推定値）、栄養塩フラックスの平均値を演算した。海底面の光合成有効放射量が $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （ナガコンブ配偶体の成熟に必要な光量の下限值：秋野 2014）よりも高いグリッドのみを抽出した。課題イ-(イ)で得られた栄養塩フラックス値と配偶体成熟率の関係式に基づき、9～12 月の各月の栄養塩フラックス値から各グリッドにおけるナガコンブ配偶体の成熟率を算出し、GIS 上で色分けして配偶体の成熟ポテンシャルマップを作成した。

幼胞子体の成長ポテンシャルマップの作成

海底面の光合成有効放射量が $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （ナガコンブ配偶体の成熟に必要な光量の下限值：秋野 2014）よりも高いグリッドのみを抽出した。GIS 上で計算された水温、光合成有効放射量（海底面推定値）を用いて、水温・光量とナガコンブ幼胞子体の相対成長速度の関係式（平成 29,30 年度水産基盤整備調査委託事業「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発」）から、各グリッドにおけるナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 ($\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}$) を計算した。また、課題イ-(イ)で推定された栄養塩フラックスとナガコンブ幼胞子体の相対成長速度の関係式から、各月の栄養塩フラックスの値を用いてグリッドごとにナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 ($\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}$) を計算した。幼胞子体の一般的な出現時期（9～12 月）について、水温・光量および栄養塩フラックスからそれぞれ推定された幼胞子体の相対成長速度を GIS 上で色分けしてマッピングした（幼胞子体ポテンシャルマップ 1、2）。幼胞子体の成長に好適な水温、光量、栄養塩フラックスの条件が整った場所（適地）を把握するために、ポテンシャルマップ 1、2 において、各月の相対成長速度が上位 25%

以内のグリッドを高成長グリッドとしてそれぞれから抽出し、月ごとに重ね合わせて幼孢子体の成長ポテンシャルマップを作成した。

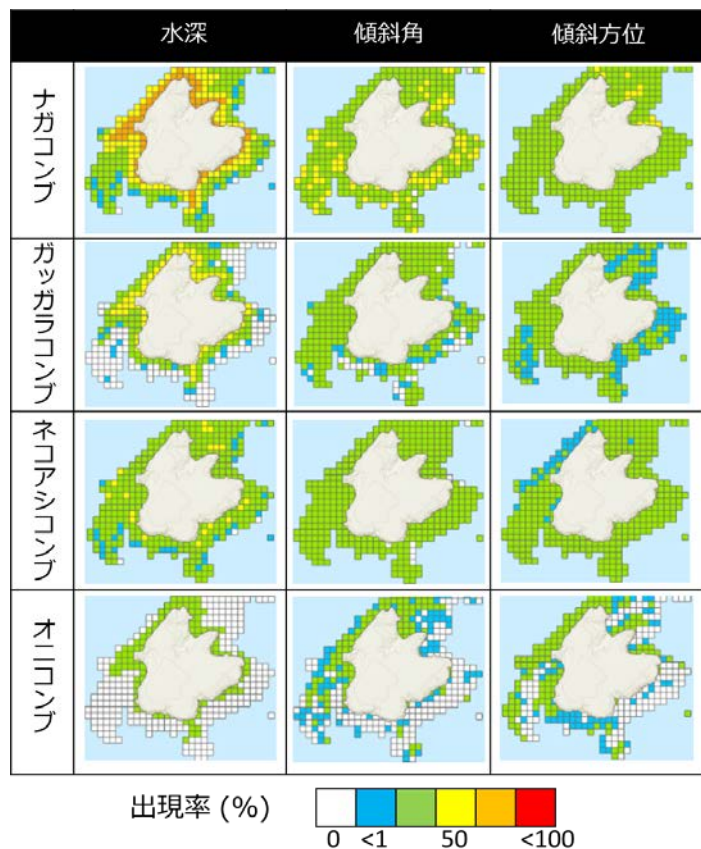
大型孢子体の生育ポテンシャルマップの作成

これまでに構築された GIS データベースにイ-(エ)の空間解析によって計算された水深、底質、傾斜度、底面流速、栄養塩フラックス（11月～3月）、積算底面光強度（1月～5月）、漁場間の 10°Cに到達するまでの日数差及び 10°Cに到達してからの水温上昇率に関するラスタデータを格納した。さらに、そのラスタデータをポイントデータに加工し直し、モデル海域の操業区域全体を 100 m グリッドデータに変換した。これにより 100 m グリッド内の漁場環境データの平均値や最大値などの抽出が可能となった。作成されたモデル海域の 100 m グリッドデータから平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度、平均底面流速を算出した。イ-(エ)の結果にもとづき、ナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件を統合し、それらの閾値を決定した。その閾値にもとづき、100 m グリッドすべてについてナガコンブ生育の可否ならびに高・低生育（生育ポテンシャル）について予測評価し、カテゴリー分けしてマッピングを行った。さらに、その評価されたグリッドの環境特性を視覚的に確認できるように、予測評価と同様に閾値情報にもとづいて平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度、平均底面流速に関する漁場環境マップも作成した。

【結果と考察】

地形・物理環境に沿ったコンブ類の分布情報の GIS データ化と分布ポテンシャルマップ

課題イ-(エ)で整理した根室市落石沿岸における地形データ(水深、傾斜角、傾斜の向き)をもとに、モユルリ島周辺のコンブ類の分布情報を集約した(図ウ-1)。ナガコンブとネコアシコンブは広い水深帯に分布していた。両者を比較するとネコアシコンブのほうがやや深い場所を好んで分布域としていた。ガツガラコンブとネコアシコンブでは、より水深が浅い場所での出現率が高かった。傾斜角では、オニコンブ以外の3種はどのような傾斜角についても 0%以上 25%以下の出現率の場所が広く見られたが、オニコンブでは分布は北西部の傾斜角が小さい範囲に固まって分布する傾向にあった。傾斜方位については、オニコンブ以外の3種は傾斜角と同様に広い範囲で出現



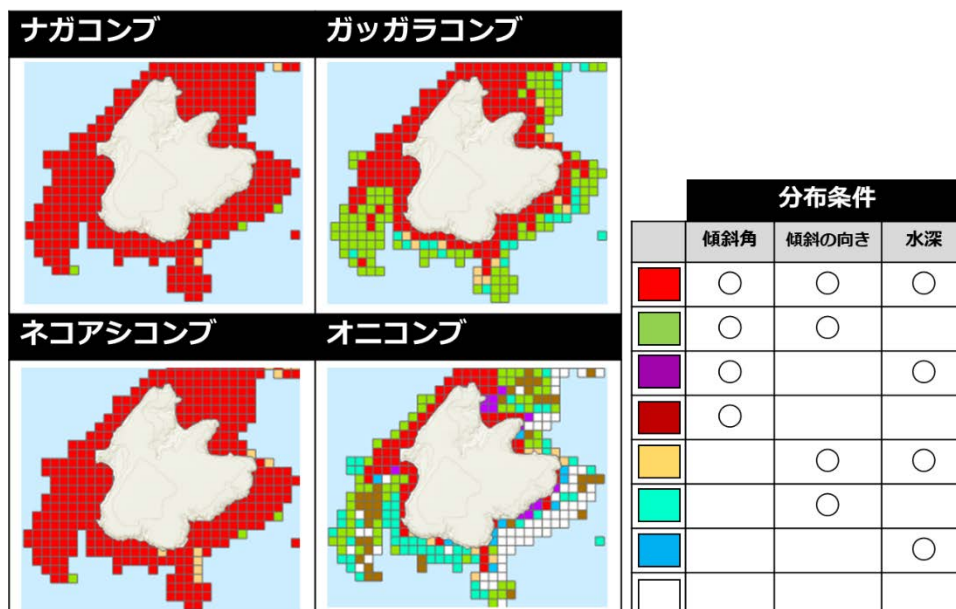
図ウ-1. 落石沿岸のモユルリ島周辺における地形データ別に示したコンブ類4種の各グリッドにおける出現率。

率が 0%以上 25%以下であったが、オニコンブでは傾斜が北西～北向きになっている海岸沿いを好んで分布していたことがわかった。

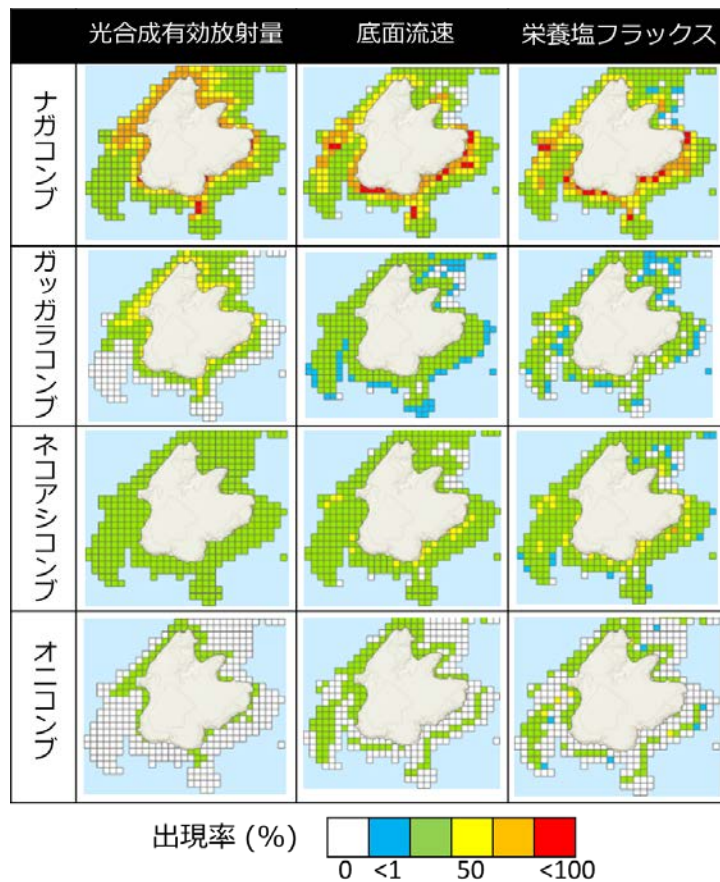
コンブ類の出現状況とグリッドの地形データを総合して、1%以上の出現率でコンブが分布する場所を示した種ごとの分布ポテンシャルマップを作成した(図ウ-2)。地形データから、ナガコンブとネコアシコンブの生育可能条件を備えた場所は広範囲にわたることが示唆された。一方で、ガッガラコンブとオニコンブはより浅い海域に分布しており、特にオニコンブはより沿岸部に限定的に分布する傾向にあった。

モユルリ島周辺の物理環境データ(光合成有効放射量、流速、栄養塩フラックス)とコンブ類の分布情報を集約した(図ウ-3)。光合成有効放射量について、ナガコンブ、ガッガラコンブ、オニコンブではより岸に近く水深が浅い場所での出現率が高くなっていた。一方、ネコアシコンブは光合成有効放射量によらず広範囲に分布できるポテンシャルを有していた。底面流速について、オニコンブ以外の3種は比較的広い範囲の底面流速でも分布ポテンシャルを有していた。一方、オニコンブはより流速が弱く穏やかな内湾になった地形の部分で出現率が高かった。栄養塩フラックスについて、各コンブ類は島の沿岸付近で出現率が高くなっていた。オニコンブでは、岸から400m程度離れた場所に栄養塩フラックスの値が適したエリアが見られた。物理環境データとコンブ類の分布の有無の状況から、落石沿岸海域において最も分布率が高かったのはナガコンブで、次いでネコアシコンブ、ガッガラコンブ、最も少なかったのはオニコンブであった。

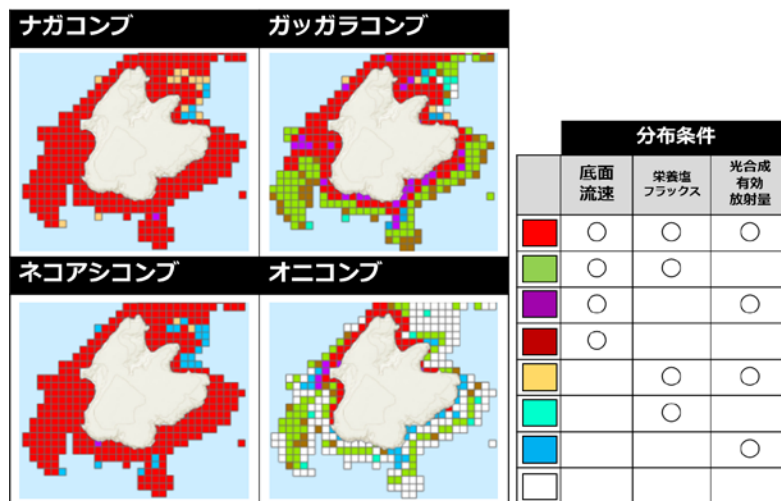
3つの物理環境を総合して、1%以上の確率でコンブが分布する場所を示した詳細な分布ポテンシャルマップにまとめた(図ウ-4)。ナガコンブとネコアシコンブでは海域のほとんどの場所ですべての分布条件が適していた。ガッガラコンブでは、モユルリ島の南部において、光合成有効放射量や栄養塩フラックスが不足していることが示唆された。オニコンブは、モユルリ島北西部の限られた範囲でのみ分布条件が適していた。



図ウ-2. 落石沿岸のモユルリ島周辺における各地形データを説明変数とした場合のコンブ類の出現率が1%以上のグリッドを示す分布ポテンシャルマップ。右表の○は適、空欄は不適。



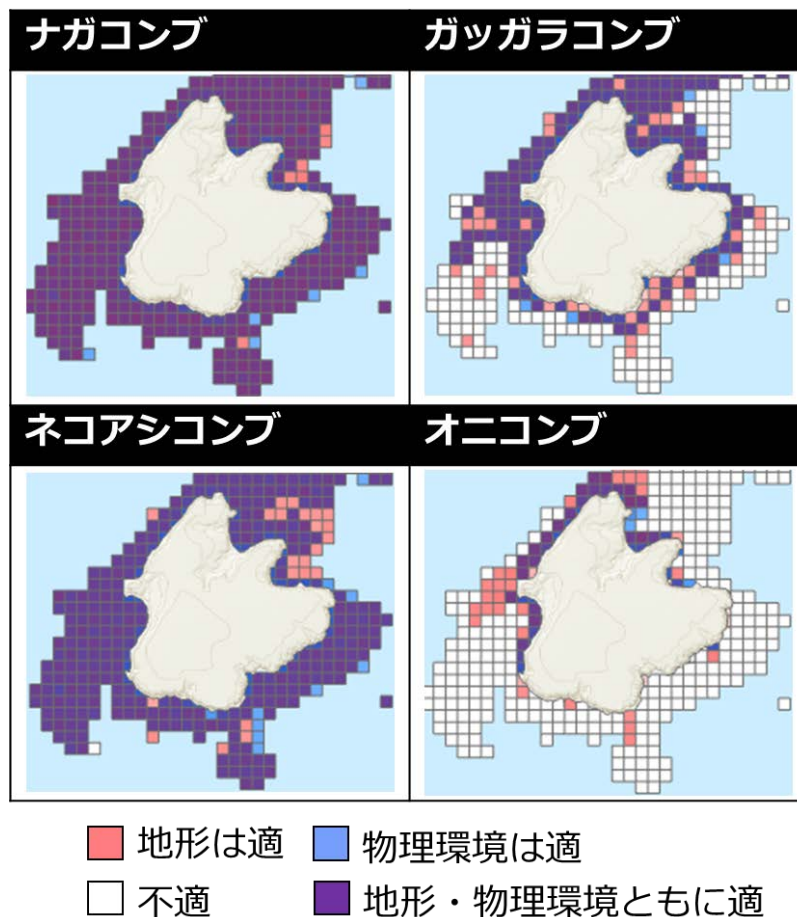
図ウ-3. 落石沿岸のモユルリ島周辺における物理環境データ別に示したコンブ類4種の各グリッドにおける出現率。



図ウ-4. 落石沿岸のモユルリ島周辺における各物理環境データを説明変数とした場合のコンブ類の出現率が1%以上のグリッドを示す分布ポテンシャルマップ。右表の○は適、空欄は不適。

図ウ-2 と図ウ-4 で示したすべての条件がコンブ類の分布に適していた海域(赤色)から、地形の条件・物理環境の条件の両方が適していた海域を示す(図ウ-5)。ナガコンブ、ネコアシコンブでは地形・物理環境ともに広範囲にわたってコンブの分布域として適していた。一方で、ガッガラコンブでは島の全域に分布するが沿岸のみで、オニコブでは島の北西部のみがすべての要素を満たした適地であった。

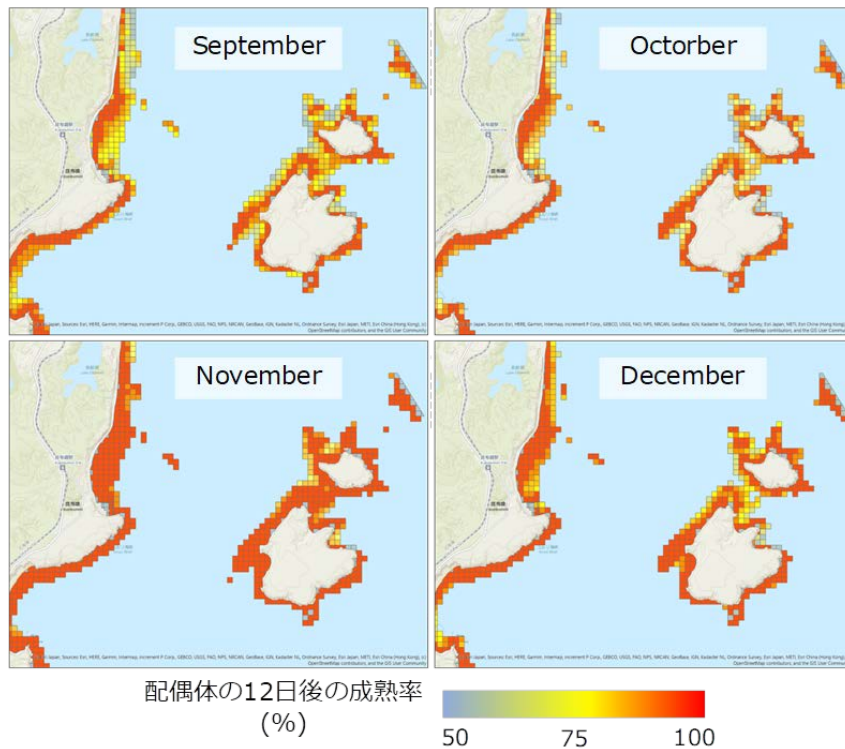
落石沿岸海域において、主要なコンブ類 4 種についての分布適地を地形・物理環境の 2 つの観点から可視化した。本課題で得られたコンブの分布ポテンシャルのマップは、対象とするコンブ種の増殖・保全を目的とした適地選定、漁場を造成する場所に適したコンブ種の選定等に際して重要な基礎資料となることが期待される。また、任意の海域において目的の種を増やすためにどのような要素が不足しているかを視覚的に把握(生育場の評価)できるようになったことで、種別にコンブ増殖を行う際の高度な漁業管理ツールとしての応用が可能と考えられる。



図ウ-5. 落石沿岸のモジュール島周辺における各コンブ類における地形の適地と物理環境の分布ポテンシャルマップ。

配偶体の成熟ポテンシャルマップ

落石海域における配偶体成熟ポテンシャルマップ（9～12月）を図ウ-6に示す。成熟率は、岸に近い海域で高く（80～90%）、岸から離れると低下する傾向が認められたが、9～12月には多くの場所で50%を上回ると推定された。成熟率が80%以上に達すると推定された海域は、9月から11月にかけて拡大し、12月にはやや縮小した。



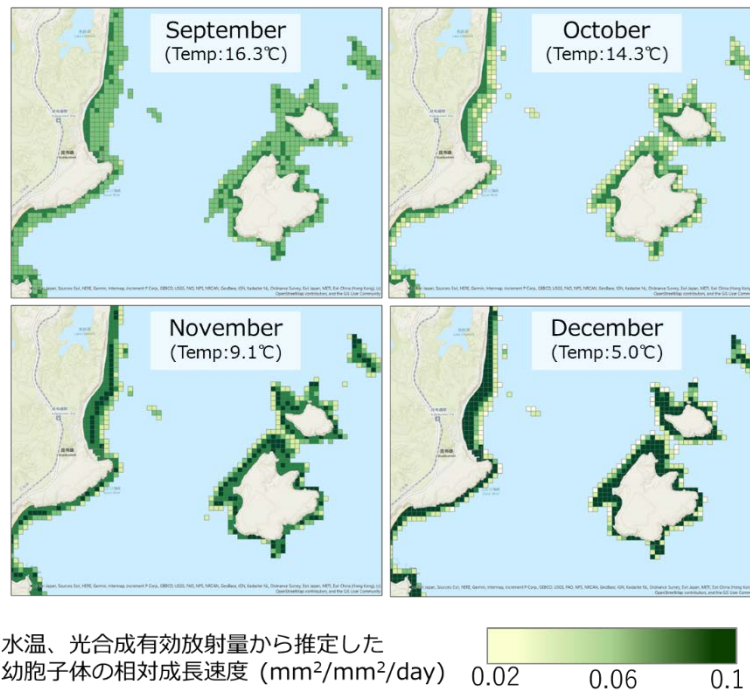
図ウ-6. 落石海域におけるナガコンブ配偶体成熟ポテンシャルマップ。

幼胞子体の成長ポテンシャルマップ

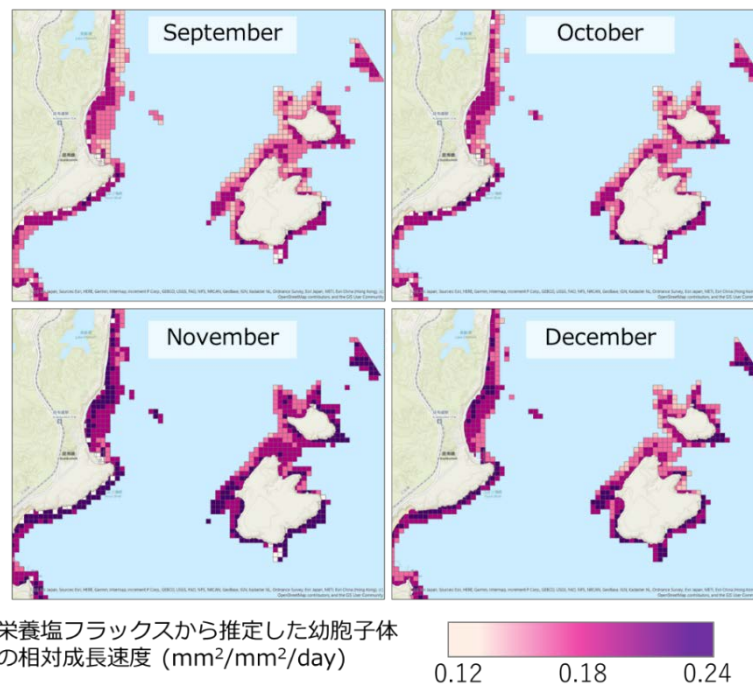
水温・光合成有効放射量および栄養塩フラックスから推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度を図ウ-7（幼胞子体ポテンシャルマップ1）および図ウ-8（幼胞子体ポテンシャルマップ2）に示す。水温・光合成有効放射量から推定された幼胞子体の相対成長速度は、9月から12月にかけて増加し、12月は岸沿いの広い範囲で高くなった（図ウ-7）。栄養塩フラックスから推定した成長速度は、9月から11月にかけて増加し、12月にはやや減少していた（図ウ-8）。また、海域の中でも東～南に面した海岸域で特に高くなると推定された。上記のポテンシャルマップ1、2において、各月の相対成長速度が上位25%以内のグリッドを高成長グリッドとしてそれぞれから抽出し、月ごとに重ね合わせた幼胞子体の生育ポテンシャルマップを図ウ-9に示した。東～南側に面している海域でナガコンブ幼胞子体の相対成長速度が高くなることがわかる。月ごとに見ると、11月に最も広い範囲で幼胞子体の成長速度が高くなることがわかった。

以上により、初期生活史のナガコンブにとって好適な生育環境条件が揃った場所を可視化することができた。生育に適した場所の選定や各地点における生育環境の評価

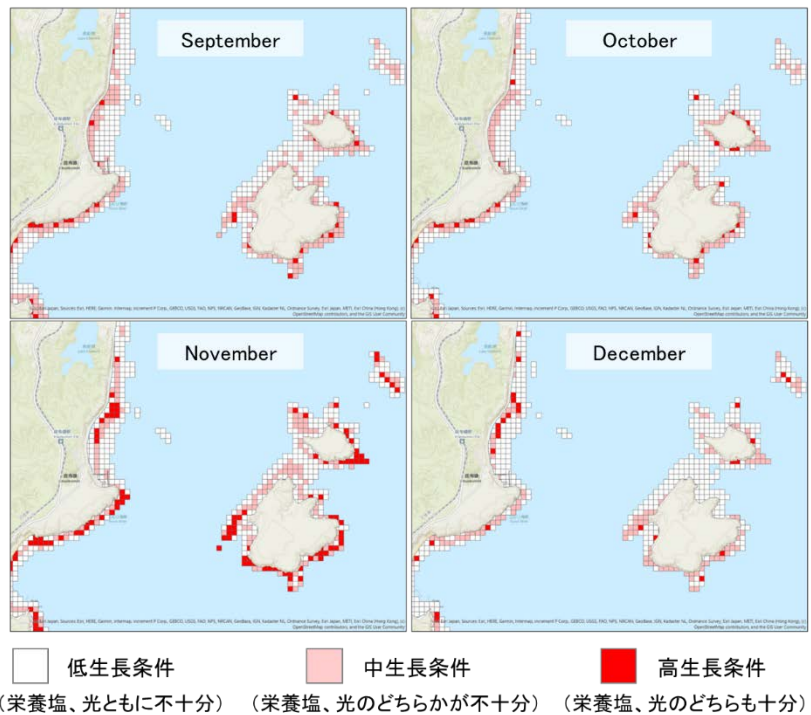
が可能になったことで、漁場造成・管理の効率化および安定化につながることを期待される。



図ウ-7. 平均水温、光合成有効放射量(2017年9～12月)から推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 (幼胞子体ポテンシャルマップ1)



図ウ-8. 栄養塩フラックス(2017年9～12月)から推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 (幼胞子体ポテンシャルマップ2)

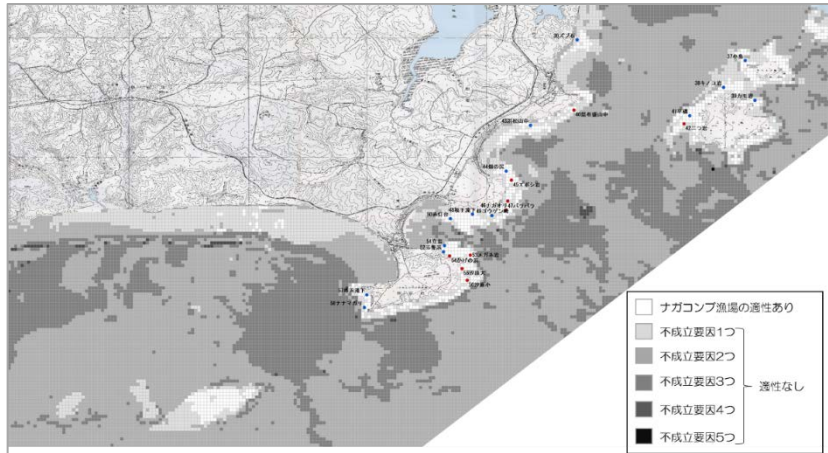


図ウ-9. 落石海域における幼胞子体の成長ポテンシャルマップ
 幼胞子体ポテンシャルマップ1、2から上位25%の高成長グリッドを抽出し、マッピングした。

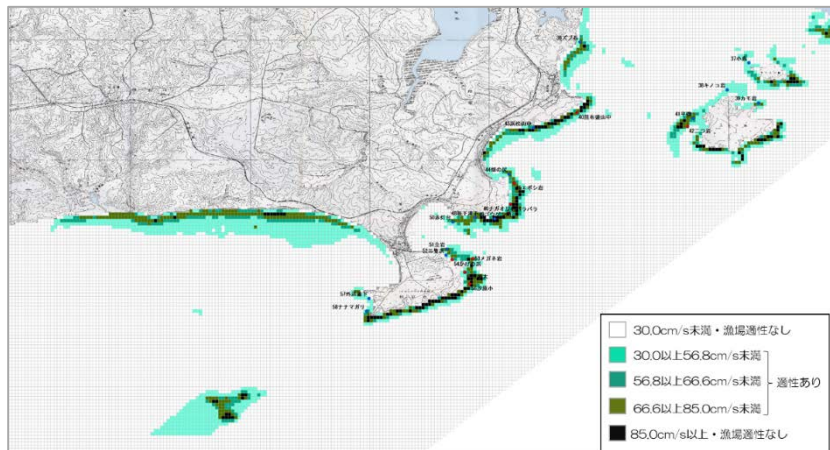
大型胞子体の生育ポテンシャルマップ

モデル海域である落石地区には100 mメッシュが29,838メッシュ生成された。そのうち、29,099メッシュがナガコンブ胞子体の生育には不向きであると判定された(図ウ-10)。底面流速、底質、傾斜度、最大傾斜度および水深の5つの物理的環境要因のうち、ナガコンブ胞子体の生育に不向きな要因が1つであったのが1,911メッシュ、2つであったのが15,868メッシュ、3つだったのが11,227メッシュ、4つだったのが92メッシュ、そして5つ不向きであったのが1メッシュであった。底面流速が遅いために不向きと判定されたのは27,703メッシュ、速いために不向きと判定されたのが142メッシュであった(図ウ-11)。底質が砂質のため不向きと判定されたのが13,024メッシュであった(図ウ-12)。

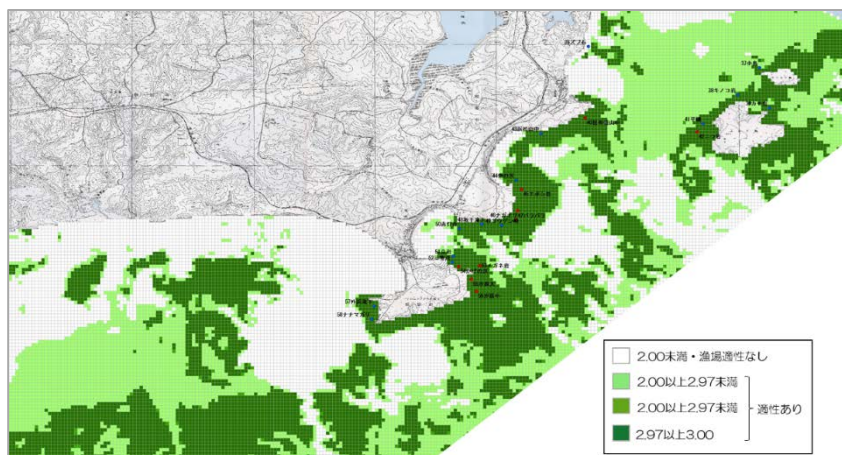
全体の傾斜が急なため不向きと判定されたのが1,198メッシュ(図ウ-13)、きわめて急峻な傾斜を含むため不向きと判断されたのが8メッシュであった(図ウ-14)。そして、水深が深いために不向きと判定されたのが25,626メッシュであった(図ウ-15)。落石地区の中でナガコンブの生育には不向きと判定された場所の多くは2つもしくは3つの要因が同時に関わっており、主に底面流速、底質、水深に起因した。「小島」の東北東及び「ナナマガリ」・「外浜滝下」の南西に『瀬』が存在し、そこもコンブ漁場としての可能性が示され、特に後者は高生育条件メッシュを多く含んでおり、ポテンシャルの高さがうかがえた(図ウ-10)。



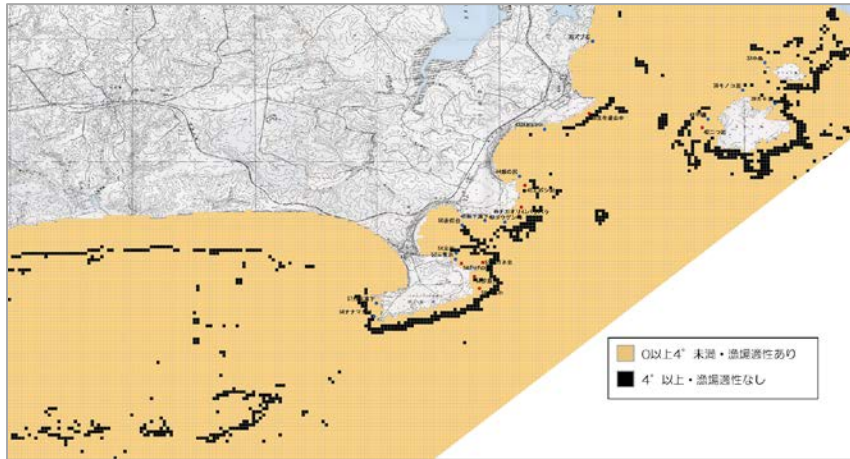
図ウ-10. モデル地域である落石地区のナガコンブ漁場の不成立環境要因の数を示した図。白はナガコンブ漁場としての適性を持つメッシュ、色が黒に近づくにつれ不成立要因の数が多く、ナガコンブ漁場の適合度が下がる。



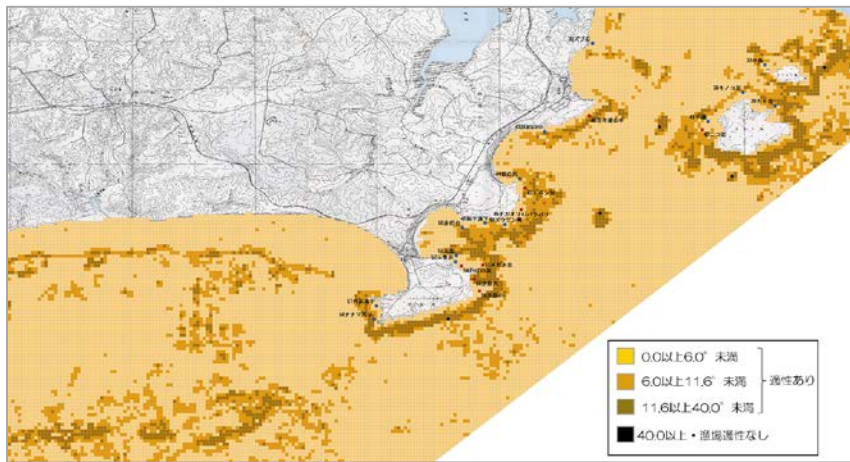
図ウ-11. 落石地区コンブ漁業操業区域の流速分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。緑色はナガコンブ漁場として流速適性のあるメッシュ、白は流速が遅く流速適性のないメッシュ、そして流速が速く流速適性のないメッシュ。



図ウ-12. 落石地区コンブ漁業操業区域の底質分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。緑色はナガコンブ漁場として底質適性のあるメッシュ、白は砂質で底質適性のないメッシュ。



図ウ-13. 落石地区コンブ漁業操業区域の傾斜度分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。ベージュ色はナガコンブ漁場として傾斜度適性のあるメッシュ、黒は傾斜がきつく傾斜度適性のないメッシュ。

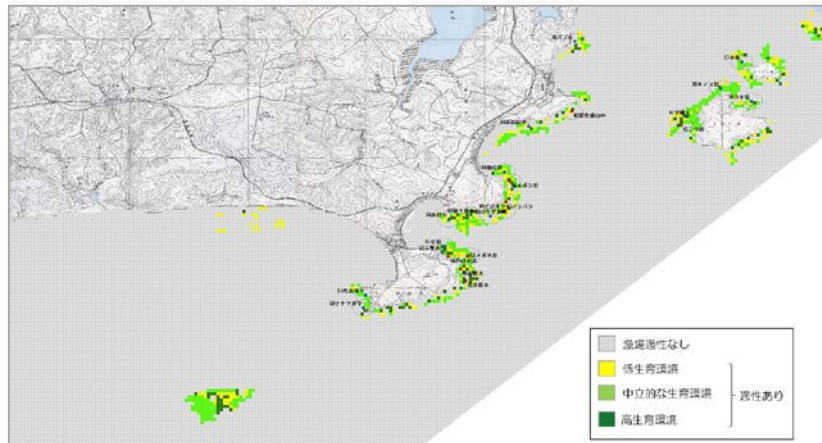


図ウ-14. 落石地区コンブ漁業操業区域の最大傾斜度分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。茶色はナガコンブ漁場の最大傾斜度として適性のあるメッシュ、黒は傾斜がきつすぎて最大傾斜度として適性のないメッシュ。

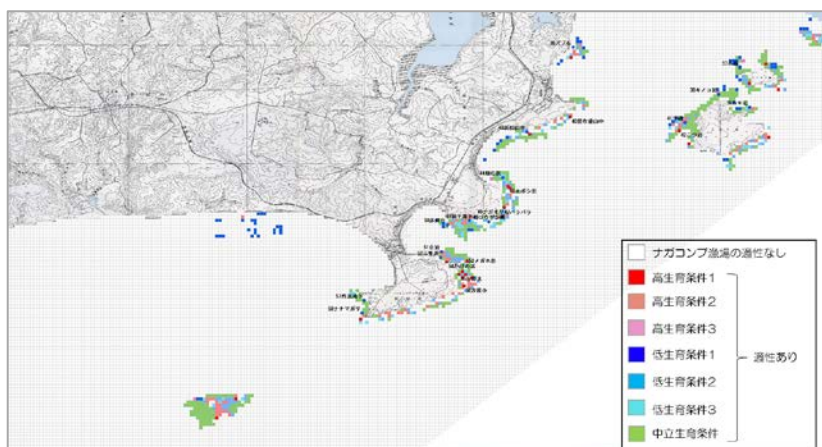


図ウ-15. 落石地区コンブ漁業操業区域の水深分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。水色はナガコンブ漁場として水深適性のあるメッシュ、黒は水深が深すぎるため水深適性のないメッシュ。

コンブ生育が可能と判断された 739 メッシュの内、高生育が期待されたのが 112 メッシュ、低生育と予測されたのが 260 メッシュ、高生育と低生育どちらも起こりうる判断されたのが 367 メッシュであった（図ウ-16）。高生育条件 1 は 15 メッシュ、高生育条件 2 は 91 メッシュ、高生育条件 3 は 6 メッシュ、低生育条件 1 は 76 メッシュ、低生育条件 2 は 118 メッシュ、低生育条件 3 は 66 メッシュそして中立生育条件は 367 メッシュだった（図ウ-17）。



図ウ-16. 落石地区コンブ漁業操業区域のナガコンブ生育ポテンシャル分布図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。灰色はナガコンブ漁場として適性がないメッシュ、黄色は低生育が予想されるメッシュ、黄緑は低生育とも高生育ともなりうる中立的なメッシュ、そして深緑は高生育が期待されるメッシュ。



図ウ-17. 落石地区コンブ漁業操業区域のナガコンブ生育ポテンシャルと生育条件分類図。色分けはナガコンブ漁場の成立環境条件ならびにナガコンブの高生育・低生育環境条件閾値にもとづいて行った。白はナガコンブ漁場として適性がないメッシュ、青色系は低生育が予想されるメッシュ、黄緑は低生育とも高生育ともなりうる中立的なメッシュ、そして赤色系は高生育が期待されるメッシュ。

高生育漁場(C1)に含まれる全てのメッシュを分類するとコンブ生育に不向きな条件メッシュは 188(49.7%)、高生育条件メッシュは 43(11.4%)、低生育条件メッシュは 76(20.1%)、そして中立条件メッシュは 71(18.8%)であった。一方、低生育漁場(C2)に含まれる全てのメッシュは、コンブ生育に不向きな条件メッシュが 261(48.0%)、高生育条件メッシュが 43(7.9%)、低生育条件メッシュが 100(18.4%)、そして中立条件メッシュが 140(25.7%)に分類された。C1 と C2 のそれらメッシュ構成は有意に異なり(カイ $X^2=8.1$, $P<0.05$)、C1 は C2 よりも高生育条件メッシュの割合が高く、中立条件メッシュの割合は低い傾向があった。また、C1 であってもコンブ生育に不向きな条件メッシュと低生育条件メッシュを含んでおり、逆に、C2 のほとんどは高生育条件メッシュを含んでいた。つまり、C1 が高生育条件メッシュのみで、また、C2 が低生育条件のみで形成されているわけではない。この結果から、今後、高生育漁場においては高生育条件メッシュ部分の維持が重要であると考えられる。一方、低生育漁場においては高生育条件・中立条件メッシュ部分をいかに管理し活用するかが低生育漁場でのナガコンブ生育を改善する上で大きなカギになると考えられる。特に、「坂下滝下」「平磯」「三隻浜」「ズブ石」は多くの高生育条件メッシュを保有していた。中でも「坂下滝下」「ズブ石」は高生育漁場との端境に位置するため、漁場管理施策によるコンブ生育の底上げが期待される。

以上のように、各生活史段階のコンブについて生育ポテンシャルを視覚化することができた。これにより、コンブの全生育段階について生育環境条件が揃った「生育適地」を選定した上で漁場造成を行うことが可能となった。さらに、生育に不適と評価された場所についても、生育の障害となる環境要因を確認できるようになったことで人為的な環境改善策の検討が可能となった。実際の地先の環境データを用いた適地選定および生育場評価が可能になったことで、漁場造成・管理の効果の安定化、最大化につながることを期待される。

参考文献

秋野秀樹 (2014); 道産コンブの生産安定化に関する研究. 道総研中央水産試験場平成 25 年度事業報告書. pp. 114-115.

エ. 天然コンブ漁場造成・管理に係わる方策の検討

【目的】

天然コンブの生育適地選定・評価に関するガイドラインを取りまとめる。

【方法】

上記ア、イ、ウの成果を取り入れて「天然コンブの生育適地選定・評価に関するガイドライン」を取りまとめた。作成したガイドラインは、本報告書に附録した。

4. 委員会などの設置・運営

以下のとおり、実施したので報告する。

○ 担当者会議

第1回 設計会議

開催日：2019年5月27日

場所： 国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所釧路庁舎会議室

参加機関： 国立研究開発法人水産研究・教育機構：北海道区水産研究所、中央水産研究所、北海道立総合研究機構：釧路水産試験場、稚内水産試験場、中央水産試験場、水産庁研究指導課、北海道大学（外部有識者）

概要：本年度の実施課題について、各担当機関が調査・実験計画について発表を行い、スケジュールや問題点について確認した。水産庁研究指導課の担当職員および外部有識者からコメントをいただくとともに、事業・調査計画についての議論を行った。

第2回 担当者会議

開催日：2019年10月24日

場所： 国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所札幌庁舎会議室

参加機関： 国立研究開発法人水産研究・教育機構：北海道区水産研究所、中央水産研究所、北海道立総合研究機構：釧路水産試験場、稚内水産試験場、中央水産試験場

概要：本年度の実施概要及び成果について各機関の担当者から報告し、調査・実験の進行具合、問題点を共有するとともに、報告書案の取りまとめのスケジュールについて確認した。

第3回 検討会議

開催日：2020年2月13日

場所： 国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所札幌庁舎会議室

参加機関： 国立研究開発法人水産研究・教育機構：北海道区水産研究所、中央水産研究所、北海道立総合研究機構：釧路水産試験場、稚内水産試験場、中央水産試験場、水産庁研究指導課、北海道大学（外部有識者）

概要：本年度の実施概要及び成果について報告した。外部有識者および水産庁研究指導課の担当職員のコメントを踏まえて年度末報告書案およびガイドライン案の内容について検討した。

○ 合同報告会

開催日：2020年2月26日

場所： 水産庁中央会議室

概要： 本年度の事業の取り組み・成果を説明し、評価委員から助言をいただいた。

5. 漁業協同組合、漁業者との意見交換

以下のとおり、実施したので報告する。

2019/5/29 歯舞漁業協同組合（歯舞漁業協同組合、北海道区水産研究所）

2019/5/29 落石漁業協同組合（歯舞漁業協同組合、北海道区水産研究所）

2019/10/29 歯舞漁業協同組合（歯舞漁業協同組合、北海道区水産研究所）

天然コンブの生育適地選定・評価 に関するガイドライン



令和2年3月

はじめに

北日本の各地沿岸には多様なコンブが“海中の森”を形成し、さまざまな海棲生物のいのちを育むとともに、多くは古来より食材として日本の食文化を支えてきました。そのコンブ漁業については、総じて天然資源が生産量の多くを占め、現在に至るまで天然漁獲は生産の柱になっています。長い歴史のなかで、漁業関係者は豊富な経験をもとに漁場を整備し、高い生産を上げてきました。しかし、天然漁獲量は減少傾向にあり、近年深刻化する気候変動が将来のコンブの生育に影響を及ぼすことが懸念されるなかで、この先、これまでの経験に頼りすぎることは避けなければなりません。現状を適切に理解して、得られる定数的あるいは定量的データをもとに漁獲の向上に努めることが必要です。

コンブは海中に育つ植物であり、葉体の移動は個体の流出を除いてありません。また、遊泳する孢子（遊走子）の移動距離も限られていることから、漁場適地の理解は今後の漁獲量の安定や増大に大きく関わります。一方で、コンブの生長や成熟は生育場所の物理的環境や化学的環境、更には生物的環境の影響を強く受け、それら環境は刻々と変化しています。従って、コンブの生育状況と、それに関与する因子を正しく調査して、定期的に漁場の評価を行うとともにより良い漁場を探索することが求められます。

本指針では、天然コンブ漁業における優良漁場を選ぶために、そして漁場を適切に評価するために有効な取り組み内容が具体的に記されています。加えて、水産庁事業「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発」による成果をもとに、天然漁獲量が最も多いナガコンブの漁場を対象にした選定・評価の実例が紹介されています。北日本沿岸のコンブは多様であり、種や変種の違いによって、また単一種であっても産地の違いによってその生態は異なるため、コンブ漁場の評価は容易ではありません。しかし、各地で得られた経験に合わせてこの指針が広く有効活用され、量的かつ質的に優れたコンブの漁獲に向けた場の整備が進むことを期待しています。

令和2年2月

「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発」

検討委員会外部委員 四ツ倉典滋

本書の構成

本書は、平成 29 年度から 3 年間にわたり実施された水産基盤整備調査委託事業「天然コンブの生育に好適な海洋環境条件の解明に基づく漁場造成適地選定手法の開発」から得られた知見に基づき、行政機関、漁業関係者、研究機関を対象として、漁場環境整備に向けた天然コンブの生育適地選定・評価のための手順、技術的な方法を取りまとめたものである。データ解析、飼育試験などの高度な専門性、専用設備を必要とする項目もあり、研究機関の助力を得ながら取り組むことが必要となるが、コンブに関する基礎的な知識および生育適地選定・評価の手順・考え方、環境、生物に関するデータ収集、調査の手法については、一般の方にも活用いただける内容となっている。

ただし、本書において解説する北海道東部海域でのナガコンブについての取り組み、成果が他のコンブ種、海域において直ちにそのまま取り入れられるものばかりではない。コンブは各海域の海洋環境と密接な係わりを持って生育しており、対象とするコンブ種、海域が異なれば、生育に必要とされる環境条件も変化する。したがって、コンブ漁場の造成・管理および環境整備にあたっては、対象海域の環境を十分に考慮し、コンブの生育に必要とされる環境条件を満たした“生育適地”を選定することが必要となる。本書はそのための考え方やコンブの生育適地選定・評価に必要な手順、手法を示したものである。

本書では、第 I 章において産業重要種を中心にコンブの分布、生活史、生育に係る基礎知識について整理し、第 II 章ではコンブの生育適地選定・評価を行う場合の手順、手法および注意点についてまとめた。先行して長年取り組まれてきた磯焼け、コンブ藻場の食害については、水産庁「磯焼け対策ガイドライン」とも重複するため簡易な説明に留めている。磯焼けおよび食害に関する情報、調査については、適宜上記ガイドラインを参照されたい。第 III 章では、我が国の天然コンブ生産の大部分を占めるナガコンブについて、北海道東部太平洋沿岸で実施した生育適地選定・評価の実例を紹介している。

- 目次 -

はじめに

本書の構成

I. コンブについて	1
I-1. コンブの種類、分布	1
I-2. コンブの生活史	3
I-3. コンブの生育に影響を及ぼす環境要因	6
II. 天然コンブの生育適地選定・評価の手順	12
II-1. 基本的な考え方	12
II-2. 対象種の選定と現況把握	13
II-3. 生育環境条件（適地条件）の検討	22
II-4. 生育適地選定、評価、対策の検討	34
III. 天然コンブの生育適地選定・評価の事例（ナガコンブ）	37
III-1. 現況把握	37
III-2. 生育環境条件（適地条件）の検討	41
III-3. 生育適地選定、評価	52

I. コンブについて

I-1. コンブの種類、分布

日本沿岸はコンブ目植物の種多様性に富む海域であり、数十種のコンブが生育している（四ツ倉 2010）。一般にコンブは形態的な特徴に乏しく、生育段階や環境条件の違いによる形態の変異が著しいことが知られている（川嶋 2012）。これらのコンブの中で生産量が多く主要産業種となっているのは、マコンブ *Saccharina japonica*、ガゴメコンブ *Saccharina sculpera*、ホソメコンブ *Saccharina japonica* var. *religiosa*、リシリコンブ *Saccharina japonica* var. *ochotensis*、オニコブ *Saccharina japonica* var. *diabolica*、ナガコンブ *Saccharina longissima*、ガツガラコンブ *Saccharina coriacea*、ミツイシコンブ *Saccharina angustata* である（学名は四ツ倉 2010 に基づく）。これらの主な分布を図 2-1 に示す。コンブの分布は、主として水温に依存するため海流の影響を強く受ける。マコンブ、ガゴメコンブ、ホソメコンブ、リシリコンブ、オニコブは季節的に対馬海流の影響を受ける海域、ミツイシコンブ、ナガコンブ、ガツガラコンブは親潮の影響下にある海域に分布している。このように、コンブは各海域の海洋環境の特性に適応しながら生育しているため、増殖対象とするコンブを決定する際には、対象海域の環境特性に合ったコンブ種を選定する必要がある。



図 2-1. 主要コンブ種の分布

Yotsukura et al. 1999、川井・四ツ倉 2005、名畑 2003 を参考に作成

参考文献

- 川井唯史・四ツ倉典滋(2005)；北海道産コンブ属植物の系統分類の現状ーリシリコンブを中心にー. 利尻研究 24: 37-47.
- 川嶋昭二(2012)；日本産寒海性コンブ類の形態と分類. 株式会社生物研究社, pp. 19-82.
- 名畑(2003)；II. 2. 1 コンブ類（北海道），藻場の海藻と造成技術（能登谷編），成山堂書店，pp. 90-100.
- 四ツ倉典滋 (2010)；日本産コンブ目植物の分類体系. *Algal Resources* 3: 193-198.
- Yotsukura N., Denboh T., Motomura T., Horiguchi T., Coleman A.W., Ichimura T. (1999)；Little divergence in ribosomal DNA internal transcribed spacer -1 and -2 sequences among non-digitate species of *Laminaria* (Phaeophyceae) from Hokkaido, Japan. *Phycological Research* 47: 71-80.

I-2. コンプの生活史

マコンブ、ガゴメコンブ、ホソメコンブ、リシリコンブ、オニコンブ、ナガコンブ、ガッガラコンブ、ミツイシコンブのような産業上重要なコンブの多くは多年生であり（ホソメコンブを除く）、以下の図 2-2-1 のような生活史を持つ。実際の天然海域では、同じ時期に複数の発生群が認められ、胞子体に移行した時期により異なる生活様式を示すことが知られており（佐々木ら 1973）、生活史はさらに複雑である。

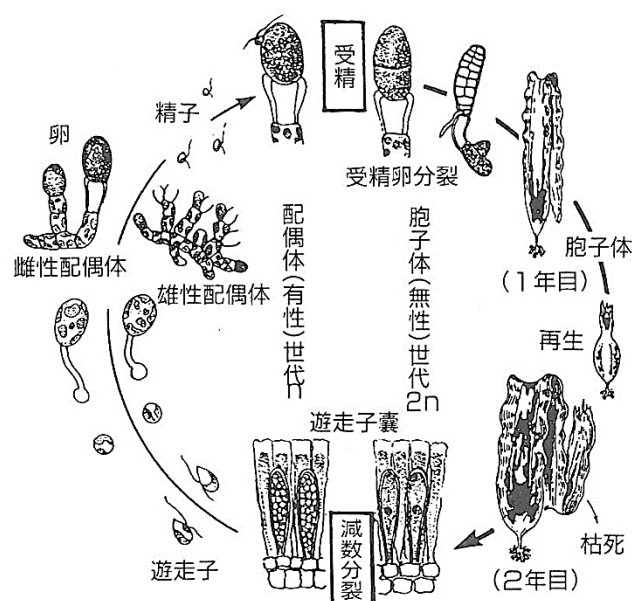


図 2-2-1. コンプの生活史の基本形

「川嶋 2003; 藻場の海藻と造成技術（成山堂書店）」より引用

コンブの成熟は、葉状体の表面に子嚢斑（遊走子を産出する斑状の部分）が形成されることで確認できる。子嚢斑の形成は、光条件、水温、栄養塩など外部環境の影響を受けるため、形成時期は水深や個体の大きさ、年により多少異なる。主要コンブの子嚢斑形成時期について、表 2-2 に示す。このように、コンブの成熟時期すなわち遊走子の放出時期は、コンブの種類や海域により異なるため、特定のコンブ種の増殖・藻場造成を目的として適地選定を行う場合には、事前に現場調査を実施して対象コンブ種の成熟時期、遊走子放出の盛期を把握しておくことが重要である。コンブ葉状体から海中に放出された遊走子は、鞭毛により海中を遊泳するが、遊泳力は弱いため、潮汐や潮流により受動的に拡散する（秋野ら 2015）。水温やコンブ種により異なるが数時間から最大で数日程度の遊泳が可能と考えられている（Fukuhara et al. 2002、秋野ら 2015）。転石や岩盤

等の基質に着生した遊走子は、雌雄の配偶体に成長し（図 2-2-2）、環境条件が整うと成熟して卵と精子を作る。室内実験により配偶体の成熟には水温、光条件のほか鉄分の有無が関連していると考えられている(Motomura and Sakaki 1981, 1984)。成熟に必要な条件が整わない場合には、成熟・受精せずに数年以上配偶体のままの状態を維持することが可能である。受精した卵は、孢子体へと移行して幼孢子体となり（図 2-2-2）、光、水温、栄養塩の影響を受けて成長する。孢子体の伸長成長は、葉状体の基部（茎との境目）付近に存在する成長帯での介在成長によって行われる。春先に周囲の海水中の栄養塩濃度が低下した後も 1~2 ヶ月間は葉の伸長は継続するが、6~7 月頃になると徐々に伸長が停止し、葉状体の先端部の枯死流出（末枯れ）が著しくなるため葉長は急速に短くなる。同時に、葉の表面に子嚢斑を形成して遊走子を放出する。多年生のコンブ種では、秋以降に再び伸長成長を開始し、1 年目の葉を押し上げる形で 2 年目の葉が伸長する（突き出し、図 2-2-2 右）。1 年目と同様に、初夏にかけて葉が伸長した後、伸長の停止と末枯れにより葉が短くなる。同時に成熟が進み、遊走子を放出した後枯死・流出する。このように、コンブは異なる生育段階を経て大型の藻体へと育つため、コンブの増殖・漁場造成を検討する際には、各生育段階のコンブが良好に生育できる環境条件を把握し、それらの条件が揃った場所を適地として選定する必要がある。

表 2-2. コンブの子嚢斑形成時期

種名	年齢	子嚢斑形成時期	場所
マコンブ	1	7 月下旬～	伊達
ホソメコンブ	1	9 月上旬～12 月	忍路湾
リシリコンブ	1	9 月上旬～4 月	利尻島
	2	7 月下旬～11 月下旬	
オニココンブ	1	9 月～3 月	羅臼
	2	7 月下旬～12 月	
ミツイシコンブ	1	10 月上旬～3 月下旬	浦河
	2	7 月～2 月	
	3	6 月～3 月	
ナガコンブ	1	9 月～3 月	釧路
	2	6 月中旬～12 月	
ガッガラコンブ	—	10 月～	根室

「名畑 2003; 藻場の海藻と造成技術(成山堂書店)」より引用

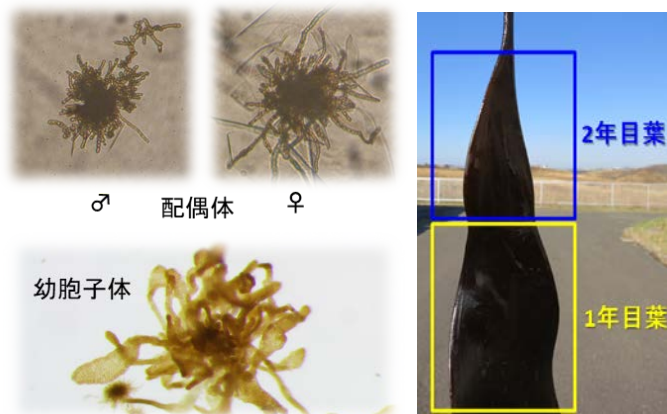


図 2-2-2. コンプの雌雄配偶体、幼胞子体、突き出しの様子

参考文献

- 秋野秀樹・川井唯史・四ツ倉典滋・河野時廣(2015) ; 北海道泊村沿岸表層におけるホソメコンブ遊走子の移送と空間的分布. 日本水産工学会誌 52(1): 1-9.
- Fukuhara Y., Mizuta H., Yasui H. (2002) ; Swimming activities of zoospores in *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). Fisheries science 68(6): 1173-1181.
- 川嶋昭二(2003) ; I. 2. コンプ類, 藻場の海藻と造成技術 (能登谷編), 成山堂書店, pp. 10-17.
- Motomura T., Sakai Y. (1981) ; Effects of chelated iron in culture media on oogenesis in *Laminaria angustata*. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries 47: 1535-1540.
- Motomura T., Sakai Y. (1984) ; Regulation of gametogenesis of *Laminaria* and *Desmarestia* (Phaeophyta) by iron and boron. The Japanese Journal of Phycology 32: 209-215.
- 名畑進一(2003) ; II. 2.1 コンプ類 (北海道), 藻場の海藻と造成技術 (能登谷編), 成山堂書店, pp. 90-100.
- 佐々木茂ほか(1973) ; ナガコンブ *Laminaria angustata* var. *longissima* (M.) Miyabe の生活様式に関する研究, 編者: 佐々木茂, 北海道立釧路水産試験場, pp. 1-94.

I-3. コンブの生育に影響を及ぼす環境要因

水中光量・光合成

光はコンブの生育に最も重要な環境要因であるが、水中では非常に減衰しやすい。水中に差し込む光は、まず紫外線や赤色光などが吸収され、水中の深所に到達するのは青～緑色の波長の光である。

水中の光は、Beer-Lambert 則に従って減衰する。これを式で表すと、

$$I_D = I_0 \exp(-k \cdot D)$$

となる。ここで k は吸光係数、 I_0 は水面直下の光強度、 I_D は水深 D m における光強度である。この減衰の割合は水の濁りによって異なり、外洋の澄んだ海水で小さな値、沿岸では海中のプランクトンや土砂などの懸濁物によって大きな値をとる。北海道において実測した例は少ないが、北海道東部海域では 0.45 との報告がある(坂西ら 2001)。

光合成は葉緑体内の反応中心のクロロフィル a に赤色光が当たることで始まるが、先述のように赤色の光は海水中で減衰しやすい。褐藻に属するコンブはフコキサンチンという赤橙色の色素を持ち、これがアンテナ色素として深所でも緑色光を効率よく吸収してエネルギーをクロロフィル a に受け渡すことで効率の良い光合成を可能にしている。

海藻群落が芽生えて成長できる限界の光量は、その海域の表面光量の 1% 前後である [0.6% (カジメ)、1.2% (アラメ) ; Maegawa et al. 1987]。実際に大型海藻の群落として成立するためにはより多くの光量が必要である。ナガコンブが分布する北海道東部太平洋沿岸では、海中のプランクトン濃度が高いため平均水面下から 3.9 m 程度が群落の成立する限界水深と推定されており、実態としても同程度の水深に分布している。一方、海水の透明度の高い津軽海峡や日本海においては、水深 13 m 程度までマコンブやリシリコンブが分布している事例が見られる(金子・新原 1977)。

水温・塩分

コンブの分布・生育は水温と密接に関係しており、マコンブでは夏季の水温が 23°C 以下の海域と生育域が概ね一致している。また、日本に分布するコンブの成長適温は 10°C 前後とされており(岡田ら 1985)、1°C 前後の低温下においても死亡はしないが成長速度は非常に遅くなる。塩分の好適値は、リシリコンブでは 28-36 である(新原 1975)。

栄養塩類

コンブをはじめとする海洋光合成生物の生育には栄養塩が不可欠である。主要な栄養塩類は、主に窒素、リンであるが、鉄の重要性も指摘されている。そのほかにも様々な微量栄養塩が必要とされる。水中の溶存態窒素の多くは硝酸態窒素であり、コンブはこ

れを吸収し体内でアンモニアに還元して窒素代謝に利用している。また、コンブは亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素のほか、有機体の窒素も吸収・利用できるとされている。コンブや植物プランクトンの増殖においては、これらの栄養塩類がバランス良く存在することが必要で、不足している栄養塩があるとコンブの成長速度は律速される。植物プランクトンでは窒素とリンの比率（N/P 比）の最適値が 16 とされており、レッドフィールド比と呼ばれている。しかし、海中の栄養塩類の濃度によりその比は変化し、理論的な最小値は 8.2、最大値は 45 であるとされる(Klausmeier et al. 2004)。窒素が制限されている状況下では N/P 比は低下し、リンが制限されている状態では N/P 比は上昇する。日本のコンブの N/P 比は、15.4~23.25 (Atkinson and Smith 1983 より計算)であることが報告されているが、海洋環境に依存して大きく変化する。コンブの配偶体の成熟には、窒素については 5 μM 以上(Mizuta et al. 2001)、鉄についても 0.4 μM 以上の濃度が必要とされている(Suzuki et al. 1994)。

コンブの分布域である北日本沿岸域での硝酸態窒素濃度の範囲は、おおむね 0~10 μM 程度であり、冬期の鉛直混合によって深層海水が表層水と入れ替わることや、海流によって栄養塩類の多い水塊が近づくことで供給され濃度が上昇する。そのほか、河川水をはじめとする陸水からも供給される(赤池ら 2002)。排水など人為的な影響のある海域ではより高い濃度が観測される場合が起こり得る。栄養塩はコンブや植物プランクトンによって常に吸収されるので、夏季に海水が成層すると深層から表層への栄養塩類の供給が停止し、浅海域では栄養塩類が消費されて枯渇する。海中のリン全体の濃度は窒素濃度よりも低く、有機体リンや粒子状のリンも存在するが、多くはリン酸態リンの状態を利用される。鉄は海中の pH 環境（弱アルカリ性）では沈殿しやすく、海藻が吸収できるイオン化した鉄は非常に微量にしか存在しないため不足しやすい栄養塩類である。外洋では窒素やリンが多いにもかかわらず、鉄がないために基礎生産が制限される海域（HNLC 海域と呼ばれる）が存在するが(武田 2007)、沿岸では河川および陸上からの砂塵によって鉄が供給されるため、窒素やリンなどよりも先に不足することはないと推測される。その他の栄養塩類については、マンガンや亜鉛が比較的要求量の多い栄養塩類であるが、沿岸域で不足を指摘する情報は少ない。

波浪、流動環境

波浪や潮流による流速の上昇は、海藻周辺の水の交換を促すことにより栄養塩や二酸化炭素のフラックスが増加し、濃度の上昇と同等の効果をもたらすと考えられる。馬場ら (2006)は、流速がコンブの近縁種ワカメの成長にもたらす効果を示した。また、カジメの幼体では、数 cm/s の比較的低い流速で成長速度が飽和することが報告されている(二村ら 2006)。

実際の海域では、さらに流速の大きな場所にコンブの濃密な群落が認められることが多い。これは、流速の大きい状況下では食害生物がコンブを摂食できず（キタムラサキ

ウニでは 0.4m/s 以上 ; Kawamata 1998)、食害が回避されるためと考えられている。しかし、ウニの食害がない実験区においても、流速 0.4 m/s 以上になると海藻の現存量が大きくなることが報告されている (川井ら 2003)。藻体密度の高い群落では、十分な海水の交換がなされるためにはより大きな流速が必要となるのかもしれない。

着生基質

コンブは、石材、コンクリートはもとよりロープ、タイヤ等の人工基質にも着生可能であり、適度に漂砂や外力で更新される基質に繁茂する (瀬戸ら 2002)。また、基質の先端部、角部、稜角を備えた凸部に多くの着生が認められる (川嶋・佐々木 1973)。これは、先端部や凸部で渦流が起きて遊走子の着生が促されること、配偶体や幼孢子体の成長がフラックス効果で高まること、光合成を阻害する浮泥の沈積が起きにくいことなどが要因と考えられる。一方、凹凸のあるブロックの凹部や、転石の間隙にはコンブはほとんど着生しない。

生物的環境

競合生物

コンブなどの基質に依存して生育する生物は、着生基質を巡り他の海藻および固着動物と競合する可能性がある。

日本に分布するコンブの寿命は長くとも 4 年であり (Hasegawa 1962)、大部分の種は 2 年である。そのため、ヒバマタ目海藻や多年生の紅藻類などの長命な海藻との基質を巡る競争に敗れる場合もある。これらの海藻のうちヒバマタ目海藻のフシスジモクは、年齢構造が付着器から読み取ることができ、少なくとも 6~7 年の寿命がある (名畑 1981) ことが知られている。その他にコンブと競合する海藻としては、ウガノモクやスジメ、チガイソ、アイヌワカメなどの大型で多年生の褐藻類のほか、オオノコギリヒバ、カレキグサ、クシベニヒバなどの多年生の紅藻類、イソキリやピリヒバ、エゾシコロなどのサンゴモ類、水中顕花植物のスガモなどがある。

コンブは小径の遊走子を多数放出し、流氷や波浪によって他の生物が剥離されたり、基質が裏返ることで生じた空き地 (ギャップ) にいち早く入植し急速に成長することで群落を形成する。これを利用したのが「磯掃除」「雑海藻駆除」と呼ばれるコンブ増殖手法である。これは水中ブルドーザーや高圧水、チェーン (名畑・松田 1983) などを用いて海底の海藻を剥ぎ取り、その後にコンブの遊走子・配偶体が着生してコンブ群落が形成されることを期待するものである。

剥ぎ取る具体的手法としては先述の方法の他に、チェーンをはしご状に展開した専用の器具を海底に沈め漁船で牽引する方法や、台船にとりつけた重機のアームの先端にチェーンが回転するアタッチメントを取り付けて海底を搔爬する専用の作業船を用いる方法などがある (北海道立釧路水産試験場 1995)。

これらの磯掃除の効果を高めるためには、コンブの遊走子が多く海中にあり、着生後の生育条件が整っている場所・時期に行うことが効果的である。例えば、北海道の小樽市でコンブ群落中に裸地を月別に作成し、その後のコンブの入植状況を検討した結果、11月～12月が最適であり、その前後の時期では他の海藻が優占してしまうことがわかっている(阿部ら 1982)。この海域におけるホソメコンブの遊走子の放出盛期が11～12月であったこと、水温や栄養塩条件が着生後の生育に適していたことがその要因と考察されている。北海道東部では磯掃除が毎年盛んに行われており、実施適期は11月から1月とされている。

食害生物

マコンブ、ミツイシコンブ、ナガコンブ、ホソメコンブは植食動物に対する摂餌阻害物質を持たないとされており(谷口ら 1992)、食害されやすい海藻と考えられる。コンブ藻場における主要な食害生物はウニ類(エゾバフンウニ、キタムラサキウニ)であり、様々な生育段階のコンブを食害する。ウニ類については、現存量が200 g/m²以上になると藻場成立の大きな障害となるとされている(東北区水産研究所 1975)。また、クボガイ、エゾザンショウガイ、コシダカガンガラなどの小型巻貝は歯舌で藻体の表面を削り取るようにコンブやその配偶体を食害することが報告されており(中田ら 2006)、岩盤・転石等の基質表面に存在する微細なコンブの配偶体や幼孢子体を食害している可能性も指摘されている(浅野ら 1990)。

参考文献

- 阿部英治・松山恵二・辻寧昭 (1982) ; 忍路湾におけるホソメコンブの群落形成. 北海道立水産試験場報告 24: 41-50.
- 赤池章一・津田藤典・桑原久実(2002) ; 北海道岩内沿岸における天然コンブ群落の形成と維持. 北海道立水産試験場研究報告 63: 41-54.
- 浅野昌充・菊地省吾・河村知彦 (1990) ; コンブ類繁茂に対する小型植食巻貝の影響. 東北区水産研究所研究報告 52: 65-71.
- Atkinson M.J., and Smith S.V. (1983) ; C: N: P ratios of benthic marine plants 1. *Limnology and Oceanography* 28(3): 568-574.
- 馬場将輔・山本正之・渡辺幸彦 (2006) ; 流水式回流水槽によるワカメの水温と水流に対する生育反応. 海洋生物環境研究所研究報告 9: 55-64.
- Hasegawa Y. (1962) ; An ecological study of *Laminaria angustata* Kjellman on the coast of Hidaka RPRV., Hokkaido. *Bulletin of Hokkaido Regional Fisheries Research Laboratory* 24: 116-173.
- 北海道立釧路水産試験場 (1995) ; 雑海藻駆除技術によるコンブ漁場の回復－釧路・根室地方のコンブ漁業発展のために.
- 金子孝・新原義昭 (1977) ; リシリコンブの生態. 北海道周辺のコンブ類と最近の増・養殖学的研究. 日本藻類学会, 21-38.
- 川井唯史・金田友紀・桑原久実 (2003) ; ウニ侵入防止フェンス内におけるホソメコンブ群落に適する底面波浪平均流速とウニ類除去時期. 日本水産工学会誌 39(3): 213-218.
- Kawamata S. (1998) ; Effect of wave-induced oscillatory flow on grazing by a subtidal sea urchin *Strongylocentrotus nudus* (A. Agassiz). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 224(1): 31-48.
- 川嶋昭二・佐々木茂 (1973) ; コンクリート・ブロックへのコンブの着生様式-1-円筒型ブロックの場合. 北水試月報 30(4): 15-26.
- Klausmeier C.A., Litchman E., Daufresne T., Levin, S.A. (2004) ; Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature* 429(6988): 171.
- Maegawa M., Yokohama Y., Aruga Y. (1987) ; Critical light conditions for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis. In Twelfth International Seaweed Symposium, Springer, pp. 447-455.
- Mizuta H., Narumi H., Yamamoto H. (2001) ; Effects of nitrate and phosphate on the growth and maturation of gametophytes of *Laminaria religiosa*. *Aquaculture Science* 49(2): 175-180.
- 名畑進一 (1981) ; 利尻島におけるフシスジモク *Sargassum confusum* の生態. 北海道立水産試験場報告 23: 53-64.

- 名畑進一・松田洋 (1983) ; 利尻島コンブ漁場の「チェーン振り」による磯掃除. 北水試月報 40(11): 249-269.
- 中田和義・山崎友資・水田浩之・川井唯史・伊藤博・五嶋聖治 (2006) ; ホソメコンブに見られる植食性小型巻貝 4 種による摂餌痕跡. 水産増殖 54(2): 217-224.
- 新原義昭 (1975) ; リシリコンブの生理学的研究-幼体の光合成と呼吸におよぼす温度, 光および塩分の影響について. 北海道立水産試験場報告 17: 11-17.
- 二村和視・岡本一利・高瀬進 (2006) ; 駿河湾深層水および表層海水中でのサガラメ・カジメ幼体の生長に及ぼす流速の影響. 海洋深層水研究 7(2): 7-11.
- 岡田行親・三本菅善昭・町口裕二 (1985) ; マコンブ, リシリコンブ, オニココンブ, ホソメコンブおよびナガコンブ幼芽胞体の生長ならびに形態と培養温度との関係. 水産庁北海道区水産研究所研究報告 50: 27-44.
- 武田重信 (2007) ; 鉄による海洋一次生産の制御機構. 日本水産学会誌 73(3): 429-432.
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川徹(2001) ; 釧路市沿岸における夏季のナガコンブの日補償深度. 北海道区水産研究所研究報告 65: 45-54.
- 瀬戸雅文・中山威尉・水口洋・田畑真一・斉藤二郎 (2002) ; 浮遊砂による基質表面の自動更新に伴う藻場形成に関する研究. 海洋開発論文集 18: 419-424.
- Suzuki Y., Kuma K., Matsunaga K. (1994) ; Effect of iron on oogonium formation, growth rate and pigment synthesis of *Laminaria japonica* (Phaeophyta). Fisheries science 60(4): 373-378.
- 谷口和也・蔵多一哉・鈴木稔 (1992) ; コンブ科褐藻数種のエゾアワビに対する摂食阻害活性. 日本水産学会誌 58(3): 577-581.
- 東北区水産研究所 (1975) ; 浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究 (別枠研究)

II. 天然コンブの生育適地選定・評価の手順

II-1. 基本的な考え方

天然コンブの生育適地選定・評価を行う場合には、対象となる海域の自然環境の特性を理解するとともに、増殖対象とするコンブ種の生態的特性を十分に考慮した上で行う必要がある。

【解説】

岩盤等の基質に固着して生活するコンブの生育は、周囲の自然環境に大きく左右される。そのため、コンブの種類や海域・地先の環境によりコンブの生育や制限要因が異なる。コンブ漁場の造成・管理、環境整備にあたっては、対象海域の生物的・物理的な環境の特性を把握し、増殖対象とするコンブ種の生態的特徴を十分に踏まえた上で適地の選定・評価を行う必要がある。

図 2-1 に天然コンブの生育適地選定・評価のフローを示す。初めに、対象海域の漁業実態や漁業従事者のニーズを踏まえた上で増殖対象とするコンブ種を選定する。次に、対象海域の自然環境を理解するために、生物調査、環境調査を実施する。対象海域における既存知見・漁業情報等を効率的に活用しながらコンブの生育制限要因を絞り込み、最小限必要な項目、労力、経費で調査を行うことが望ましい。現況把握の結果を受けて、適地選定を行うために必要となるコンブの生育環境条件（適地条件）を検討する。この条件に基づき、対象コンブ種の生育適地選定・評価を実施し、漁場造成・対策について検討する。

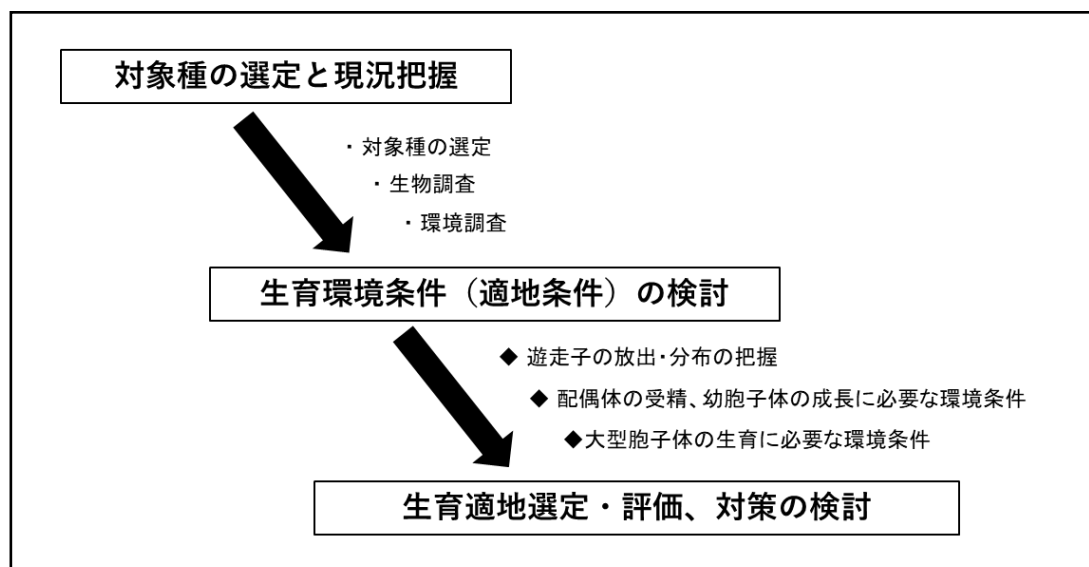


図 2-1. 天然コンブの生育適地選定・評価のフロー

II-2. 対象種の選定と現況把握

漁業実態、ニーズに基づき増殖対象コンブ種を選定する。対象海域における自然環境とコンブを含む動植物の分布、生育についての正確な情報を得るために現況調査を行う。

【解説】

コンブ種の生育域は、海流系、水深、波浪等の環境特性と密接に関連しているため、増殖対象とするコンブ種は対象海域に自生するコンブ種の中から選ぶことが望ましい。漁業の実態、漁業従事者のニーズ、経済性の見地から検討を行い、対象とするコンブ種を決定する。

コンブの増殖を検討する際、対象海域における動植物の分布・生育状況と自然環境に関する情報を正確に把握しなければならない。特に、適地選定・評価を行う上では、コンブの生育制限要因や生育環境条件の特定が必要となるため、生物、環境に関する定量的なデータの取得が不可欠である。

必要となる調査項目について、表 2-2-1 に示した。植物であるコンブの生育は、主に光条件、栄養塩、水温により直接的に影響される。コンブが利用できる光の量は、海水中の懸濁物量や濁度、他の海藻類との競合により影響される。コンブの栄養塩の吸収・利用効率は波浪・流況により影響されるため、海中の栄養塩濃度は流動を考慮したフラックスとして評価する必要がある。水温については、水深や海水交換の程度により影響される。ウニ類等によるコンブへの食害が著しい海域では、食害生物に関する調査も併せて行う必要がある。このように、光条件、栄養塩、水温の直接的な調査のほか、必要に応じて競合海藻、食害動物等についても調査を実施する。

表 2-2-1. 現況把握のための調査項目

調査項目		事前調査
植生・分布	コンブ類	○
	他海藻	△
光環境		○
水温		○
水質	栄養塩	○
	塩分	△
波浪・流況		○
海底地形 (水深、底質、傾斜度など)		○
食害動物 (ウニ類、魚類等)		△

○: 必須、△: 必要に応じて実施

海域・地先によりコンブ生育に影響を及ぼす環境要因が異なる可能性があるため、対象海域における既存の知見・データおよび漁業情報等を効率的に活用しながら生育制限要因を絞り込み、最小限必要な項目、労力、経費で調査を行うことが望ましい。

調査方法

現況把握のための調査方法について以下に示す。これらの調査手法を用いた北海道東部太平洋沿岸のナガコンブの例について、「III. 天然コンブの生育適地選定・評価の事例（ナガコンブ）」で解説した。

（1）生物調査

対象海域に生息・生育する動植物の分布状況を調査し、対象コンブ種の選定および生育環境条件の推定に役立てる。コンブを含めた海藻類および食害生物（ウニ類など）（図 2-2-1）の分布、種組成とそれらの季節変化を把握する。主な調査方法として、ベルトトランセクト調査、方形枠調査（図 2-2-1）などの実地調査のほか、音響測器による探査、航空写真・衛星写真などリモートセンシングにより得られた情報を地理情報システム（GIS）で解析する手法が用いられる（食害生物、海藻の調査についての詳細、具体例は、「水産庁 磯焼け対策ガイドライン」https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/や「環境省生物多様性センターが実施するモニタリングサイト 1000」のマニュアル <http://www.biodic.go.jp/moni1000/manual/index.html> を参照のこと）。

生物調査においてコンブの食害生物の個体数や現存量を把握するためには、方形枠を海底に置いて枠内の動物類をすべて採集し、単位面積当たりのウニ類、小型巻貝の個体数および現存量を集計する。何らかの理由で潜水調査ができない場合には、方形枠と水中カメラを組み合わせた装置を用いて、ウニ類の密度を把握する（高橋 2003）。ただし、この手法では現存量の把握が困難であり、海藻が多く海底が見えにくい場合には推定精度が落ちることに留意する必要がある。I 章で示したように、ウニ類の現存量が 200 g/m² を超えると藻場の成立に大きな影響を及ぼす。このような場所では、漁場造成を行った後に食害動物が蟄集し、コンブ藻場の維持が困難になる可能性が高い。また、投石漁場や転石場では層状に積み重なった石の下部に食害動物が潜伏し、表面から見えるよりも実際の密度、現存量が高い場合があるため注意が必要である。

調査対象地の海藻相は、その場所における海藻の遷移の進行状態や極相状態の構成種、環境のかく乱要素の有無・程度を示している（中林・谷口 2003、芹澤・大野 1995 など）と考えることができる。新たな漁場を造成した場合、当初はコンブが優占するが、年数が経過するとコンブの現存量が低下し、別の海藻種に置き換わることが知られている。そのため、対象海域においてコンブおよび競合海藻の分布、現存量を詳細に把握することが重要となる。これらの海藻を寿命や形体によってカテゴリー分けするには片田（1963）が参考になる。コンブの寿命は 2～3 年程度であるため、それより寿命の短い

アオサ類などの海藻が優占している場合には環境のかく乱が大きい場所であると推測される。一方、多年生のホンダワラ類、紅藻類、顕花植物のスガモが優占している場合には環境のかく乱が小さい漁場と判断することができる。対象海域におけるコンブを含む海藻種の組成、現存量について把握し、漁場の維持管理や生育適地選定のための基礎資料として役立てることが重要となる。

上記の海藻、食害生物の調査を行うにあたっては、対象海域において漁業協同組合、研究機関等が実施しているコンブの生育調査、環境調査のデータ等を積極的に活用し、省力化、コストダウンを図ることが重要となる。



図 2-2-1. 生物、調査の様子

(2) 環境調査

基質に固着して生活するコンブは、生育場の海洋物理環境に大きく左右される。地先の海洋環境変動に適応した特性を持つと考えられるため、コンブの生育に影響を及ぼす底質、地形、水深、波浪・流況、水質（栄養塩）、水温、光量等の幅広い環境要因を時空間的に網羅するように収集・整理する。これら環境要因は、場所や時間により常に変化するため、広域かつ長期的な調査・観測には多大な労力、経費がかかる。そのため、既存の観測データや気象衛星データおよびそれらを用いた数値計算結果を活用することを検討すべきである。ただし、コンブが生育する沿岸域の環境は地形や局所的な気象、波浪・流況の影響を受けやすいため、最低限の現地観測を行い、その結果を衛星データ、数値計算結果と照合し、データの精度を検証した上で活用することが望ましい。

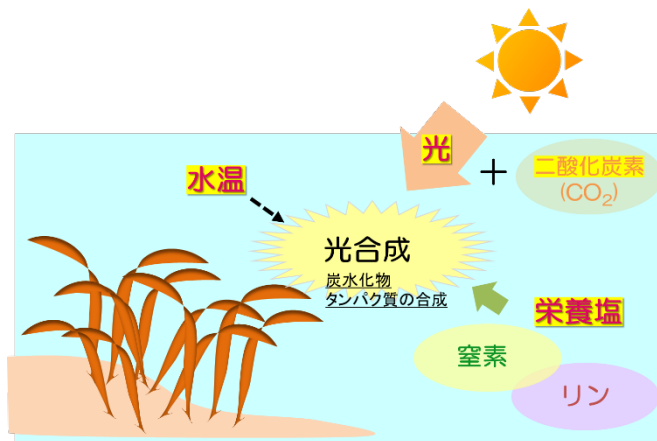


図 2-2-2. コンプの光合成・生育に影響を及ぼす環境要因

植物であるコンブの光合成および生育に直接的に影響を及ぼす主要因は、光条件、水温、栄養塩である（図 2-2-2）。基質に固着しているコンブの栄養塩吸収は海水の流動に左右されるため、藻体に吸収される栄養塩の量や効率を考える際には、海水中の栄養塩濃度と海水流動を合わせた栄養塩フラックスとして考慮する必要がある。光条件はコンブの成長（伸長）に大きな影響を及ぼすが、コンブの生育する海底面に届く光は、水中での減衰や植物プランクトン・浮遊粒子等による分散・反射を受けるため、海上で観測される光とは大きく異なる。また、コンブが生育する浅海域では、気温、日射等の気象条件、河川など陸水、海水交換の程度等に影響され、短期間で海水温が変動する。このように、コンブが経験する水温、栄養塩、光環境は様々な要因により変化する。これらの点を踏まえた上で、以下に各要因の季節的、空間的変動を把握するための手法、注意すべき点について整理する。

栄養塩

コンブが生育する亜寒帯海域では、地先の栄養塩（特に溶存態無機窒素 DIN）の濃度が季節的に大きく変動する（田中ら 1991、葛西 2000 など）。また、河川の近傍などでは春先の雪解け時期や大雨後に陸水が大量に流入するため、他と異なる栄養塩濃度の傾向を示すことがある。季節的・空間的に変動する栄養塩濃度の動態を把握するためには、対象海域における水質調査は一年を通じて行うとともに、可能な範囲で頻度を高め、複数地点で実施することが望ましい。

対象海域の藻場もしくはその近傍にある漁港、防波堤などにおいて、バケツもしくは採水器を用いて海水サンプルを採取する。また、コンブ藻場近傍に海水ポンプを備えた揚水施設があれば、より安易に海水を採取することが可能である。ただし、取水口が陸水の影響を受けやすい場所（河口付近など）や海水交換が制限される場所（漁港内など）に設置されていないかを事前に確認する必要がある。揚水施設において採水を行う場合

には、海水の取り入れ口に近い位置（着水槽など）において実施することが望ましい。また、施設内での海水の滞留時間により海域の栄養塩濃度変化との間にタイムラグが生じる可能性があるため注意を要する。

海水サンプルは暗黒条件下で氷冷しながら持ち帰り、冷凍保管する。分析では、溶存無機窒素 DIN（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素）およびリン酸態リンの濃度を測定する。沿岸域では、大雨後などに河川から陸水が大量に流入するため、栄養塩濃度が一時的に急上昇することがある。このような一過性の栄養塩濃度の変化を把握するためにも、複数地点で月に数回程度の頻度で調査・採取を行うことが望ましい。

コンブの生育は、海水中の栄養塩濃度と海底付近の流況に相互的に影響されるため（八谷・松本 2019）、各地点における栄養塩の動態はフラックスとして考慮する必要がある。これら水質調査の結果を季節・地点間で比較することで各成分について海域の季節的、空間的な変動傾向を把握し、コンブの生育適地選定・評価の基礎資料とする。

水温

コンブの成長、成熟、末枯れは水温により直接的に影響される（岡田ら 1985、桐原ら 2003、坂西ら 2001a）。また、コンブが分布する亜寒帯沿岸域では、冬季の低気温により表層水が冷却されて沈み込むことで鉛直混合を生じ、それにより深層から栄養塩濃度の高い海水が表層に供給される。また、春から秋にかけては、気温が海水温よりも高いために表層水の冷却が起きず成層化することで深層からの栄養塩供給が停止する。このように、海水温の変化はコンブの生育に直接影響を及ぼすとともに、地先の栄養塩供給とも密接に関連している。

コンブが生育する浅海域では、地先の水温は気温の影響を受けやすく、短時間に海水温が変化するため、自記式の水温測定機器による連続的な観測が望ましい。測定機器は、コンブ藻場もしくは近傍の海底に設置（図 2-2-3）するのが理想的であるが、近くに揚水施設があれば施設の貯水槽、揚水タンク内に設置することでメンテナンスやデータの回収が容易になる。ただし、揚水施設内では海域よりも気温の影響を受けやすくなるため、設置場所の選定は慎重に行う必要がある。

光環境

光環境はコンブの成長（生産量）を大きく左右する要因である（坂西ら 2001a）。光量については、植物が光合成に利用可能な波長（光合成有効波長域：400～700nm）の光量子束密度（ $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）を測定するのが理想的である。照度（lx）は、人間の眼から見た明るさを示す単位であるため、水中のように光の波長の組成が大きく変化する場合には、照度と光合成に用いられる光エネルギー量が一致せず、光合成のための光環境を表すにはあまり適当ではない（村上ら 1992）。陸上の太陽光や白色の蛍光灯などであれば照度と光量子量との換算は照度計と光量子計で相関を取ることである程度可能であるが、水

中では赤色光が先に減衰し波長の構成が水深によって大きく変わるため、照度と光量子量は大きく相違する可能性がある。コンブが生育する海底付近の光量を測定するためには、コンブ藻場近傍の海底に光量子計を設置し、断続的に観測するのが望ましい。ただし、これらの観測機器を海中に設置した場合、数日以内にセンサー表面に微細藻類が入植・繁茂し、正確な値の測定が困難となる。水中での連続観測を行う場合には、センサー表面の定期的な清掃もしくは付着物除去機能を有した測定機器の導入が必要となる。もう一つの方法として、海辺の遮蔽物のない建物屋上等に観測機器を設置（図 2-2-3）して海面付近相当の光量を測定し、水中での光の減衰曲線（減衰率）をもとに各水深の光量子束密度を算出する方法がある（坂西ら 2001a、2001b、コラム 1）。後者の方法を採用する場合には、事前に対象海域において海中光の現場観測を行い、坂西らの方法により減衰曲線や吸光係数（光の減衰率）を推定する必要がある。また、光の減衰率はプランクトンの増殖や浮泥などの影響を受けて常に変化する。そのため、算出される海底面の光量子束密度には一定の誤差が含まれることに留意しなければならない。地先・漁場間での空間的な差異を検討する場合には、雲の有無や天候により地点間で光量子量が変化するため、各气象台・気象衛星の観測データを活用するのが望ましい。

（コラム 1）衛星データを用いた海底面光強度の計算方法

地球観測衛星 NPP の光合成有効放射量をデータソースとして利用する。海底面の光強度を計算するためには水深に応じた吸光係数（光の減衰率）の算出が必要となる。光量子計の付属する測器でのモニタリング調査データを用い、水深と光量子量の関係を指数関数で近似させ、吸光係数 k を導く。衛星データから計算された光合成有効放射量を海面の光強度として、光強度の計算式 [$I_D = I_0 \exp(-k D)$; I_D : 水深 D での光強度、 I_0 : 海面の光強度、 k : 吸光係数]にもとづいて各水深および海底面の光強度を計算することができる

（坂西ら 2001a、2001b）。

根室市落石地区における
水深と光量子量との関係
(2019年3月)

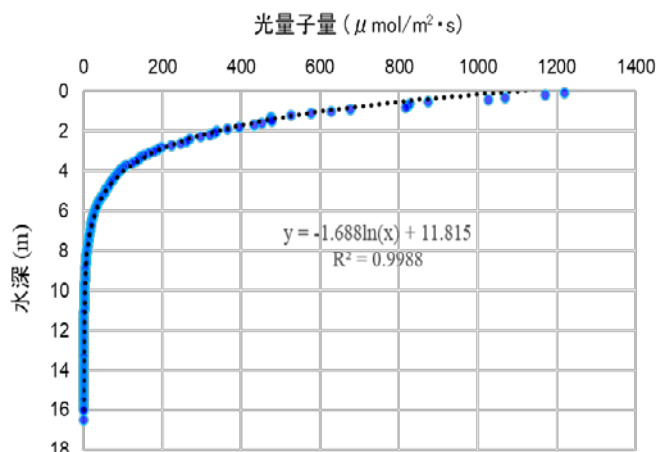




図 2-2-3. 現場観測、設置した水温計、照度計

海底地形

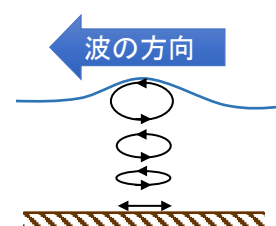
海底地形は主に水深、底質、傾斜度、傾斜角などで表現することができる。近年、海底地形図が電子化された状態で発行されており、購入してすぐに GIS 上で海底地形を表現することができる。しかし、漁場規模の空間スケールを高精度で解析したい場合や購入が難しい場合は、紙媒体の海底地形図をスキャンし GIS 上でプロットを打ちながら手作業で漁場の水深と底質を電子化することが可能である。その後、電子化した水深データから傾斜度や傾斜角を算出する。紙媒体の海底地形図を利用する場合、水深と底質が細かく記載されている「漁場基本図」を利用すると良い。提供してもらえるように地先の漁業協同組合に協力を求めることが必要となる。また、海底地形図のない漁場を調査対象にする場合には、GPS と魚群探知機で漁場をトレースして海底地形図を作成することも可能である（内田ら 2008、山崎ら 2013 など）。

波浪・流況

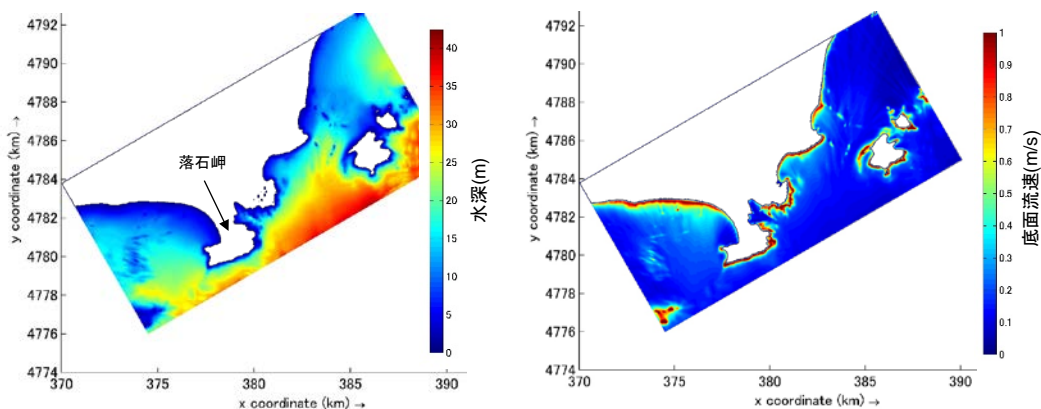
波浪や海水の流動は、コンブの栄養塩吸収効率に影響を与え、コンブの生育を左右する重要な要因の一つである。コンブの生育には、底面流速（振動流、底面軌道流速）と呼ばれる海底面付近の流れが特に重要となる。底面流速は、海底地形および波高データを用いて流動モデルから算出することが可能である（コラム2）。

（コラム2） 底面流速

波で生じる流れは水深と波の性質（波高、波長）によって決まる。流れの動きは水面近くでは円あるいは楕円軌道であるが、海底近くではかなり扁平した楕円や楕円が完全につぶれて波の進行方向に往復（振動）するようになる。このため底面流速は底面軌道流速、振動流速とも呼ばれる。一般的に底面流速は水深が浅くなるにつれて大きくなるため、岸に近い場所で大きな値となることが多い。



波で生じる流れの軌道



根室市地先の水深と計算例(2018年8月平均値)

使用したデータ、ソフト

- ・海底地形: 日本水路協会 M7000 シリーズ
- ・沖波条件: 国土交通省港湾局ナウファスの有義波の月平均値(波高、周期、波向き)
- ・解析ソフト: Delft3D

参考文献

- 葛西広海 (2000) ; 親潮海域における栄養塩と基礎生産の季節変動. 日本プランクトン学会報 47(2): 116-118.
- 片田実 (1963) ; 海藻の生活形と遷移. 日本水産学会誌 29(8): 798-808.
- 桐原慎二・藤川義一・能登谷正浩 (2003) ; 水槽中で培養したマコンブ胞子体の子嚢斑形成と生長におよぼす水温及び光周期の影響. 水産増殖 51(4): 385-390.
- 村上克介・洞口公俊・柴田治男・森田政明・相賀一郎(1992) ; 植物栽培用人工光源の開発に関する考察. 生物環境調節 30(4): 135-141.
- 中林信康・谷口和也 (2003) ; 秋田県八森町沿岸における海藻群落の遷移と漂砂の影響. 水産増殖 51(2): 135-140.
- 岡田行親・三本菅善昭・町口裕二 (1985) ; マコンブ, リシリコンブ, オニココンブ, ホソメコンブおよびナガコンブ幼芽胞体の生長ならびに形態と培養温度との関係. 水産庁北海道区水産研究所研究報告 50: 27-44.
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川徹・飯泉仁・山本正昭 (2001a) ; ナガコンブの光合成及び生産力と関連した水中の光環境について. 藻類 49(2): 117-123.
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川徹 (2001b) ; 釧路市沿岸における夏季のナガコンブの日補償深度. 北海道区水産研究所研究報告 65: 45-54.
- 芹澤如比古・大野正夫 (1995) ; 土佐湾の外海域に設置した人工礁上に着生する海藻類の遷移. 日本水産学会誌 61(6): 854-859.
- 高橋和寛 (2003) 試験研究は今 No.497 「水中自動写真撮影装置を使ったウニ類資源量調査について」 <https://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/o7u1kr00000075s5.html>
- 田中勝久・佐藤芳和・角田富雄 (1991) ; 道東沿岸域における栄養塩濃度の季節変化 (親潮水域における海洋環境と飼料生物生産維持機構の解明). 北海道区水産研究所研究報告 55: 161-172.
- 内田圭一・宮本佳則・武田誠一・東海正・柿原利治・塩出大輔 (2008) ; GPS と魚群探知機を用いた沿岸浅海域における海底地形図の簡便作成法. 日本水産工学会誌 45(2): 93-100.
- 八谷光介・松本有記雄 (2019) ; マコンブの生長速度に対する定常流流速の影響. Algal Research 12: 1-10.
- 山崎新太郎・原口強・伊藤陽司 (2013) ; レジャー用魚群探知機を利用した水底地形調査. 応用地質 54(5): 204-208.

II-3. 生育環境条件（適地条件）の検討

現況把握の結果・データをもとに、対象海域における増殖対象コンブ種の生態的特性の把握および生育制限要因の特定を行い、適地選定・評価の際に必要なコンブの生育環境条件（適地条件）を推定する。

【解説】

増殖対象とするコンブ種について、生育段階を①遊走子（浮遊世代）②配偶体、幼孢子体（微視的な世代）③孢子体（巨視的な世代）の3つに区分し（図 2-3-1）、飼育実験、現場調査、データ解析により各生育段階における生態的特性を明らかにする。対象海域の環境データとコンブの各生育段階における生態的特性、分布・生育状況を比較し、対象コンブ種の生育制限要因の特定と各生育段階における生育環境条件（適地条件）の推定を行う。

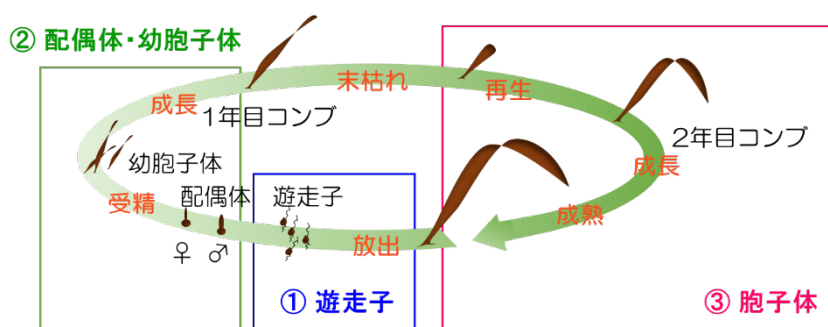


図 2-3-1. コンブ（2年生）の生活史と本課題における生育段階の区分

野外調査により対象海域におけるコンブ遊走子の分布および漁場への供給の有無を確認するとともに、着生後の配偶体の成熟・受精、孢子体の生育と海洋環境との関係を飼育試験により把握し、対象コンブ種が着生から大型孢子体に至るまで生活史全体を通して生育可能な環境条件を推定する。

以下に、遊走子の分布状況の把握、生育段階ごとの生育環境条件（適地条件）の推定方法について説明する。

① 遊走子の放出時期、分布パターンの把握

コンブ漁場の造成・管理、環境整備を行うためには、まず始めに増殖対象とするコンブ種の遊走子がある場所に供給されているか否かを確認しなければならない。対象海域において、コンブ遊走子の放出時期、分布パターンを把握するための現場調査を実施する。その結果に基づき、遊走子放出の最盛期における遊走子の分布を生育環境条件（適

地条件) の1つとして考慮する。

コンブの遊走子放出の時期や量を知るために、対象海域において海水を定期的に採取する。海面からカップなどで海水を採取した後、フタ付きの容器に入れて密封して持ち帰る。運搬の際には、クーラーボックスなどで保温する。持ち帰った海水をフィルター(孔径 0.45 μm) でろ過することで、フィルター上に海水中の遊走子を得ることができる。このフィルターを用いて、培養法もしくはリアルタイム PCR 分析法(以下を参照)により海水中のコンブ遊走子量を推定する。コンブの遊走子量を時期・場所間で比較することで、対象海域におけるコンブ遊走子の時空間的な分布パターンを把握する。

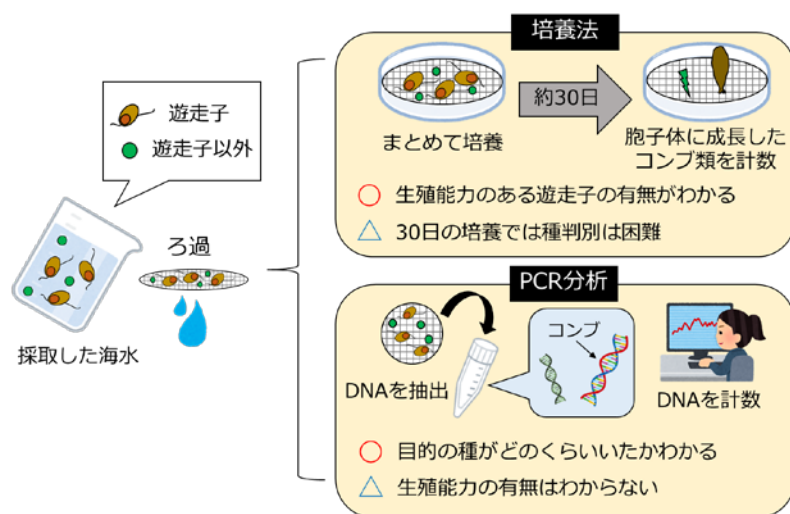


図 2-3-2. 遊走子量推定のために用いる培養法、PCR 分析法の模式図

● 培養法 (名畑 1989)

培養法は、フィルター上に残った遊走子から育てた胞子体を計数することで、ろ過した海水に含まれるコンブ遊走子の量の指標とする方法である(図 2-3-2)。シャーレにフィルターと栄養塩強化海水(PESI 培地)を入れ培養し、約1か月後にフィルター上に生えたコンブの胞子体を実体顕微鏡下で計数することで、海水中のコンブの遊走子数の指標とする。

● リアルタイム PCR 分析法 (高谷ら 2016)

リアルタイム PCR 分析法は、フィルター上に残ったコンブの DNA 量を定量的に把握する方法である(図 2-3-2)。コンブの遊走子の細胞壁などのタンパク質や光合成色素などを除き、核の中の DNA だけを抽出する必要がある、専門的な器具や薬品が必要となる。抽出できた DNA の中には、プランクトン類などほかの生物の DNA も混ざっているため、目的の DNA だけに反応するプライマーを使ってコンブの DNA だけを増やし、その増加量からろ過した海水に含まれるコンブの DNA 量を把握することができる。

② 配偶体、幼孢子体の生育に必要な環境条件の推定

コンブの配偶体、幼孢子体の生育は、水温、光、栄養塩の動態に影響される。また、これらの環境要因には相互作用があり、いずれかの条件が悪化するとコンブの生育に影響が表れる。配偶体、幼孢子体の生育に必要な環境条件を推定するためには、上記3要因を変化させた組み合わせ試験を行い、水温、光、栄養塩がコンブの生育に及ぼす影響を把握する必要がある。微視的である配偶体、幼孢子体は、天然環境下での観察や測定が困難であるため、人為的に環境を制御した容器内での培養試験により環境要因との関係を検討するのが望ましい。

増殖対象とするコンブ種の配偶体・幼孢子体の成長特性の把握には以下のような項目の実験を行う必要がある。

- (1) 水温・光に対するコンブの成長特性の把握
- (2) 水温・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握
- (3) 流速・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握

(1) 水温・光に対するコンブの成長特性の把握

コンブの初期成長において光環境は非常に重要であり、遊走子から発芽した雌性配偶体は一定以上の光量を受けないと卵形成がおこらず、孢子体ができない(図 2-3-3)。また、孢子体については光合成量から呼吸量を差し引いた純光合成量の収支がプラスになっていることが生存・成長の為に必要である。このとき、光合成は温度にあまり影響を受けませんが呼吸量は温度に依存して増加するため、同じ光量でも水温が高ければ生存に必要な光量は増大する。光量・水温が対象コンブ種の生育に及ぼす影響を正確に把握するためには、複数の水温条件と光量条件を組み合わせた飼育実験を行う必要がある。

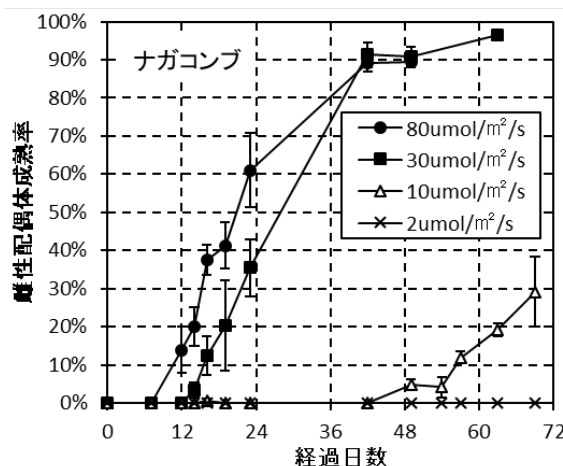


図 2-3-3. ナガコンブ配偶体における培養光量別の経過日数に対する成熟率の関係 (秋野 2014 より引用)

(2) 水温・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握

十分な光量が確保されている場合、栄養塩量はコンブの成長速度を促進する作用がある。コンブは、取り込んだ栄養塩を利用して窒素含有色素であるクロロフィル a やそのほかの細胞構成物の合成を行っていると考えられている。他のコンブ種では、栄養塩が高い環境では高水温に対する耐性が高まることが知られている (Gerard 1997)。したがって、対象とするコンブ種についても、複数の水温条件と栄養塩条件を組み合わせた飼育実験を行い、幼孢子体の成長に及ぼす影響を把握する必要がある。

(3) 流速・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握

流速はコンブに対して成長に必要な栄養塩や炭酸塩の取り込みに対して促進的に作用する。粘性のある液体中において、流体と物体の滑りがないため、粘性の効果により速度の遅い層（境界層）が物体上に存在する。表面直上では流速は理論上 0 となり、物質の輸送は拡散によってのみ行われる。流速が増大して層流から乱流状態になると、境界層はなくなり物質の輸送効率が高まる。理論的には流速×栄養塩濃度の値（フラックス）に比例して成長が早まり、取り込み速度を上回ると一定になると考えられる。流速および栄養塩フラックスがコンブの配偶体・幼孢子体に及ぼす影響を把握するためには、流速を変化させた条件下での飼育試験が必要となる。フラックスに対する成長の変化を把握するためには、ポンプなどで水流を発生させた環境下にコンブを着生させた試験片を設置する（二村ら 2006）。その他に電動ろくろ（ターンテーブル）に円形水槽を設置して回転させ、水槽内に試験片を吊り下げて試験する方法がある（川井ら 2000、秋野 2013：図 2-3-4）。また、より大きく成長した孢子体について流速の効果を検討するには、流動発生装置を備えた大型の水槽が必要である（馬場ら 2006）

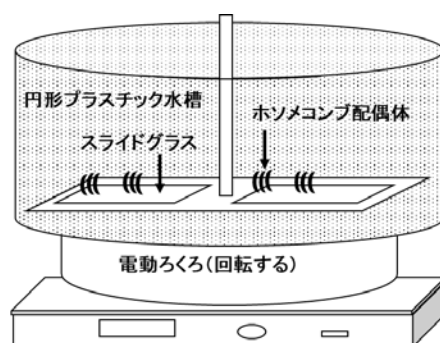


図 2-3-4. 流速を作用させながらコンブを培養する装置の一例（秋野 2013）

これら (1) ~ (3) の試験結果をもとに、配偶体の成熟率、幼孢子体の成長速度を目的変数、各環境要因を説明変数として定式化し、対象海域におけるコンブの配偶体、幼孢子体の生育ポテンシャルの評価に役立てる(「II-4. 生育適地選定、評価、対策の検討」を参照)。

③ 大型孢子体の生育に必要な環境条件の推定

コンブ孢子体の生育に必要な環境条件を推定するためには、まずコンブの生育と海洋環境との関係性を把握する必要がある。しかし、微視的な大きさの配偶体、幼孢子体とは異なり、種によっては藻体が 10 m 以上にも達する大型のコンブ孢子体については、人為的に環境を制御した飼育条件下で長期にわたり生育を調べることは困難である。自然環境に近い条件下での飼育実験もしくは野外調査によりコンブの生育と環境との関係性を把握した後に、漁場情報やコンブ生育データを用いた統計解析により生育環境条件の推定および生育ポテンシャルの評価を行う。

孢子体の成長・成熟と海洋環境との関係性の把握

対象とするコンブの成長、成熟、末枯れと環境要因(主に、栄養塩、光条件、水温)との関係を明らかにし、各環境要因がコンブ生育に与える影響と作用時期を推定する。コスト、労力、施設などの面から大型のコンブ孢子体の長期飼育は負担が大きいいため、既往の知見・データを積極的に活用し、最低限の飼育試験により必要な情報を得ることが望ましい。

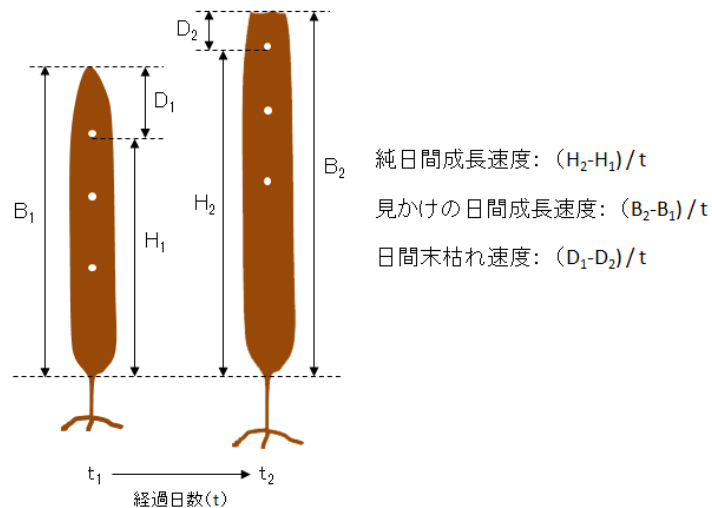
コンブの孢子体は、冬(11~2月)に成長(伸長)を開始し、春から初夏に成長盛期を迎える。4月頃からは葉状体の先端部が徐々に枯れて(末枯れ)葉長が減少する。また、初夏から秋にかけて藻体表面に子嚢斑を形成(成熟)する。このようなコンブ孢子体の成長、末枯れ、成熟の過程は、水温、光環境、周囲の海水中もしくは藻体内に貯留された栄養塩濃度・量の影響を受ける。したがって、コンブ孢子体の生育適地選定・評価を行うためには、対象コンブ種の生育と環境要因との関係性を把握する必要がある。コンブの生育と環境との関係性を把握するためには、人為的に環境が制御可能な水槽内での飼育試験が望ましいが、大型のコンブ孢子体を長期間にわたり飼育するには大規模な設備が必要となるため、設備がない場合には天然もしくは養殖場のコンブを用いて検討することになる。コンブの生育パラメーター(葉長、葉幅、重量など)を定期的に測定するとともに(コラム3)、コンブの近傍で機器による水温、光量の観測と栄養塩(DIN、リン酸態リン)濃度の測定を行う。コンブの各生育パラメーターと海洋環境とを比較し、生育に影響を及ぼす環境要因と作用時期を絞り込む。

飼育試験により検討を行う際には、以下の点に留意し、自然環境に近い条件で飼育を行う必要がある。

- ・天然に近い光環境（周期、強度）を与えるために、太陽光を利用する。
- ・飼育水をかけ流し条件にして十分な海水交換を図ることで、気温変化による海水温への影響を最小限に抑えるとともに、海水中の栄養塩濃度が天然海域とかけ離れないようにする。
- ・水槽内に流れを生じさせ、コンブの栄養塩吸収を促すとともに、コンブ藻体上に付着する藻類の増殖を抑制する。

(コラム3) コンブの成長・末枯れ速度の測定

多くのコンブは、春から秋にかけて葉状体の先端部が枯れるため、定期的に葉長の測定を行うだけでは成長量を正確に把握することができない。そのため、コンブの葉状体にパンチで穴を開け、一定期間後に穴の移動距離を測定することで成長（伸長）速度を推定する必要がある [下図：駒澤ら(2010)、Mann (1972)]。介在成長を行うコンブでは、基部付近にある成長帯に穴を開けた場合、葉状体の伸長量を過少評価してしまう可能性があるため、可能な限り葉の先端部に近い位置に複数の穴を開けるのが望ましい。末枯れは葉状体の先端部で生じるため、穴開け時と測定時の葉状体の先端から穴までの距離を比較することで末枯れ量、速度を推定することができる（下図）。



ピンホール法によるコンブの成長速度、末枯れ速度の推定方法.

駒澤ら(2010) を参考に作成

漁場データを用いた胞子体の生育環境条件および生育評価基準値の推定

漁場として活用されている藻場、すなわち十分な量の漁獲が見込めるコンブが生育している場所には、大型胞子体が生育する条件が整っていると考えることができる。上記「胞子体の成長・成熟と海洋環境との関係性の把握」において得られるコンブ生育と環境との関係を考慮し、コンブの漁場情報、生育および環境データ（海底地形、光、水温、栄養塩フラックスなど）を用いた統計解析により対象コンブ種の生育環境条件を推定する。

漁場として利用されているコンブ藻場の分布、コンブの生育に関するデータ（長さ、幅、重量など）と海洋環境との係わりを統計解析により検討し、コンブの大型胞子体の生育に必要な環境条件および生育の高低を決める環境条件を推定する。コンブの生育や藻場の分布には年変動があるため、複数の年、場所のデータを用いて検討するのが望ましい。以下に、コンブ胞子体の生育に必要な環境条件、生育ポテンシャル評価に資する環境条件の推定手順（図 2-3-5）、必要となる検討項目、内容および留意点について示す。

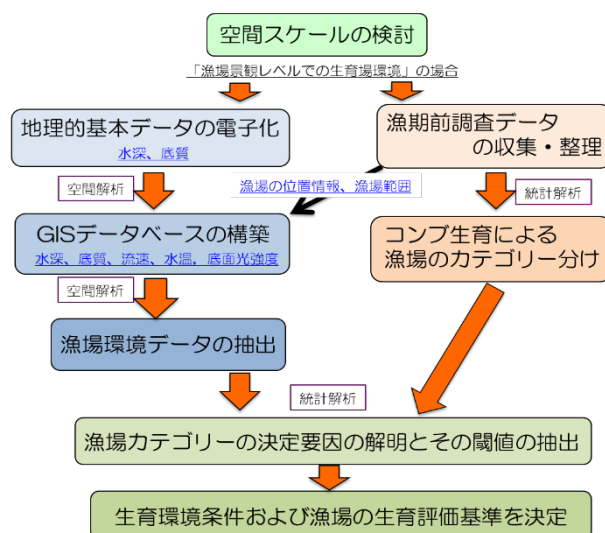


図 2-3-5. コンプの生育環境条件および生育評価基準値の推定手順

◆ 空間スケールの検討

生物の生育・生息に必要な環境条件を把握するためには、初めに対象生物およびその生活史と関連する空間のスケールを決める必要がある。生物にとって好適な環境条件が揃っていたとしても、空間スケールを広げて見るとその環境条件の重要性が大きく変化し、生存の可否を決めるほどの大きな要因とはならないこともある。そのため、目的に応じた空間スケールを考慮に入れながら、場合によっては複数の空間スケールで生物の生育環境条件を検討することが望ましい。基質に固着して生活するコンブでは、生育は局所的な環境変化に左右されやすく、隣接する漁場間でも生育差が認められることから、

漁場範囲程度の空間スケール（数百メートル四方）で生育環境条件を検討するのが妥当であろう。

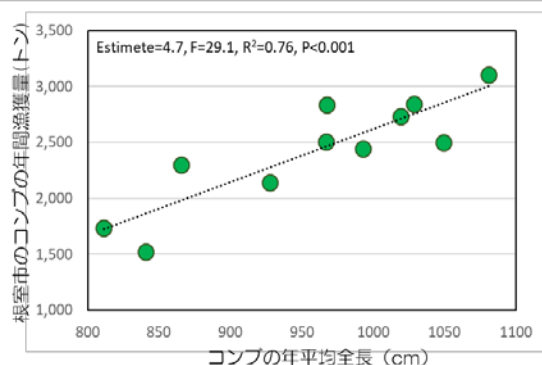
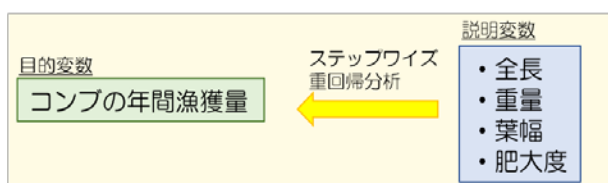
◆ コンブ生育データの収集・整理、生育を示すパラメーターの選定

コンブの生育環境条件を特定するためには、生育の好悪を判断するための指標が必要となる。まず、現況調査および地先の漁業組合等が実施している調査により得られた各漁場におけるコンブの生育に関するパラメーター（全長、葉長、葉幅、重量、肥大度など）のデータを収集・整理する。これらのデータとコンブの年間漁獲量との関係を確認し、年間漁獲量との相関が高いパラメーターをコンブの生育を示すパラメーターとして選定する（コラム4）。年間漁獲量は、基本的にはその年のコンブの生育状況を反映していると考えられるが、漁業従事者数や出漁日数など人的要因にも影響されることに留意する必要がある。

（コラム4） コンブ漁場データと生育を示すパラメーターの選定

北海道東部太平洋沿岸の地域では、毎年5～6月に「コンブ漁期前調査」が行われている。この調査は、漁業協同組合が中心となり、漁期に入る前にその年のコンブ生育状況を把握し、漁期の開始日を決めるために行われる。その調査方法は地域により異なるが、調査に熱心な地域では各漁場からコンブを10本程度採集し、長さ、重さ、葉幅を測定し、そのデータに基づいてその年のコンブ生育状況を判断している。年により調査を行う漁場が異なることもあり、単純に漁場間でデータを比較することはできないが、複数年のデータをまとめ上げていくことで、コンブ生育の指標として利用することが可能になる。

根室市の例では、漁獲量と「漁期前調査」のコンブ生育に関わる各種データを比較した結果、生育状況を示す変数としてコンブの長さを利用するのが良いということがわかる（下図）。



根室市のコンブの年間漁獲量（トン）とコンブの平均全長（cm）との関係。

ステップワイズ重回帰分析の結果、コンブの年間漁獲量を説明する変数としてコンブの平均全長のみが採用され、コンブの平均全長が長い年は年間漁獲量も高くなる傾向が見られた。

◆ 物理環境情報の電子化と GIS データベースの構築

広域かつ連続的に海域・漁場の物理的環境を把握するには、地理情報システム(GIS)の活用が有効である。GIS データベースを作成するにあたり、地形図、水路図、漁場基本図といった地理的情報を含んだデータソースを入手し、GIS に組み込む。(図 2-3-6)。基本的な地図データとして陸側の地形図と海側の漁場基本図を用意する。陸側の地形図は国土地理院のホームページからダウンロードし、GIS 上に組み込む。一方、海側の漁場基本図は地先の漁業協同組合が独自に作成したもので、水深、底質や定置網の位置など漁業に関わる重要な情報が詳細に記されている。紙媒体であるこの漁場基本図をスキャナーで取り込み、その画像を GIS 上で、底質の輪郭ならびに等深線に沿ってポイントを打ちながら、底質と水深のデータをそれぞれ電子化する。底質については、数値化(砂質:1、礫質:2、岩盤質:3 のように)しておくことで数値計算、統計解析が容易になる。電子化された底質および水深のデータは、空間解析によって空間補完し、ラスタデータ(格子状に並んだピクセルで構成されているデータ)として GIS データベースに格納していく。なお、この水深のラスタデータからさらに空間解析を行うことで傾斜度のラスタデータを生成することができる。

水温や光合成有効放射量などの衛星データ、底面流速などのモデルデータについては、位置情報(緯度・経度)と水温、光合成有効放射量、底面流速などの環境情報を含む格子状のデータセットを用意し、同じく空間解析によって空間補完されたラスタデータとして GIS 上に格納する。このようにして地理・物理的環境情報の電子化とともに基本的な GIS データベースを作り出していく。

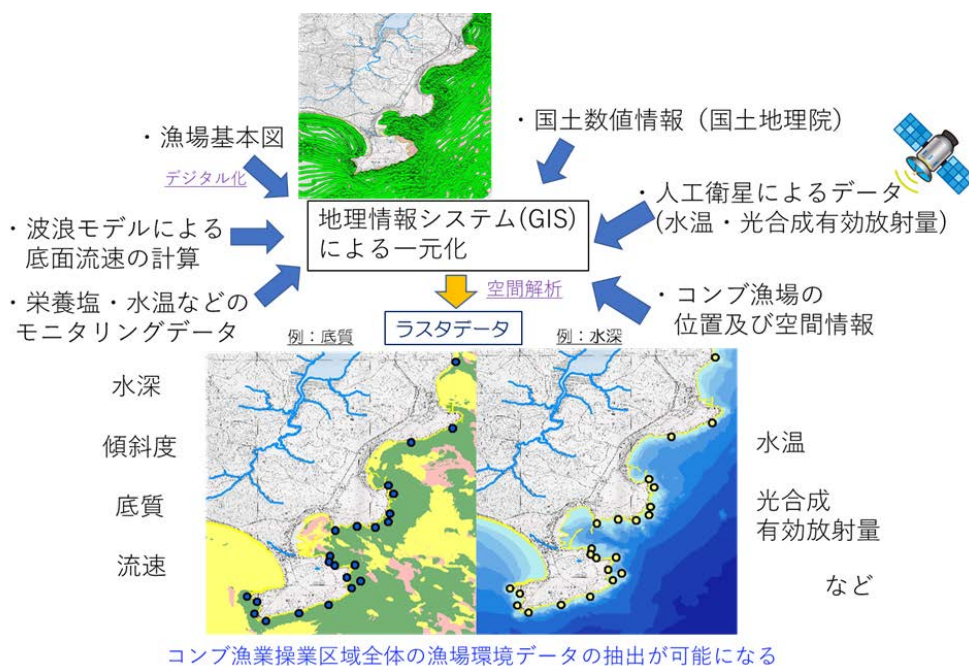


図 2-3-6. 地理情報システム(GIS)による物理環境情報の電子化のプロセス

◆ 漁場環境データの抽出

漁場の環境情報を得るために、各漁場の中心部の緯度・経度をまとめ、GIS上に漁場中心部のプロットを置き、事前に聞き取った情報をもとに各漁場の広がり（範囲）を決定する（図 2-3-7）。GIS データベース上にある例えば水深、底質、傾斜度及び底面流速などのラスターデータから、空間解析によって各漁場の漁場範囲内の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均底面流速などを計算することができる。このように、GIS を用いることで各漁場における複数の環境情報を効率的に収集することができる。

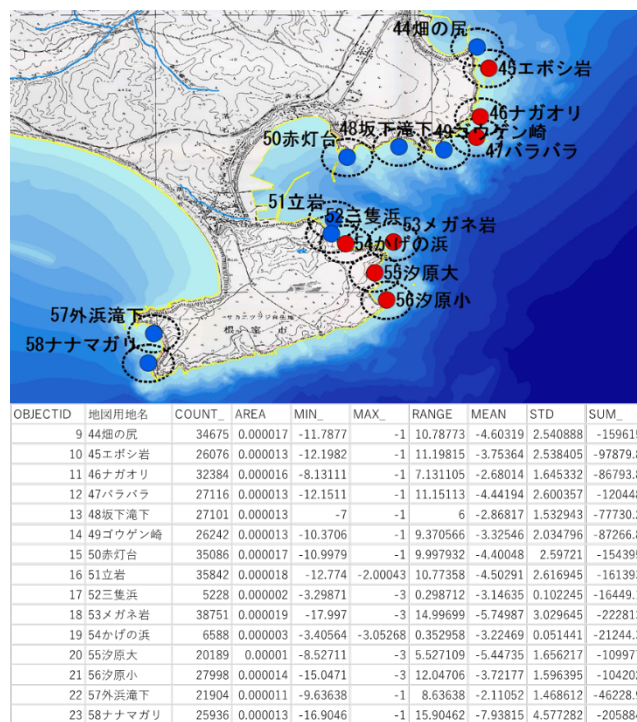


図 2-3-7. ラスタデータからの各漁場の環境情報の収集

上図：円形の点線は漁場範囲。

下図：GIS の空間解析により漁場範囲から収集した水深に関する情報。

◆ コンプの生育環境条件および生育評価基準値の推定

コンプの生育を左右する環境条件について検討する場合、コンプ生育の可否を決める環境条件（生育環境条件）とさらにコンプ生育が可能な環境下ではコンプ生育の高低を決める環境条件（生育評価基準値）が存在する（図 2-3-8）。

生育環境条件の推定にあたっては、対象海域とその周辺海域を含め、対象コンプ種についてできるだけ多くの漁場データを収集し、解析に活用することが望ましい。GIS により得られた漁場の環境情報から各環境要因について共通する閾値を抽出し、それをコ

ンブ生育の可否を決める環境条件（生育環境条件）とする。

生育評価基準値を推定するためには、まず生育パターンにもとづいて漁場をいくつかの 카테고リーに分類する。葉長、葉幅など生育を示すパラメーターの測定値を「コンブ生育の絶対評価値」とし、さらにそこから標準化された「コンブ生育の相対評価値」と「コンブ生育の相対的なばらつき」の3変数を用いて、クラスター分析、主成分分析などの多変量解析を行い、コンブ漁場を複数のカテゴリーに分類する。なお、漁場カテゴリーの数が多くなるほど、その後の閾値の算出が複雑になるため、その場合は統計解析手法に工夫を要する。分類された漁場カテゴリー間で各環境要因を比較し、大きく異なる環境要因を把握する。その上で、漁場カテゴリーを応答変数に、各環境要因を説明変数として決定木分析などの多変量解析を用いることで、漁場カテゴリーの決定要因を明らかにするとともに、コンブ生育の高低に関わる環境要因の閾値（生育評価基準値）を導き出すことができる。水深、底質、流速および傾斜度といった物理的環境要因とくらべて、水温および海底面光強度は時空間的な変動が大きく、スケールも異なるため、解析を行う場合には両者を分けて行うのが良い。また、海底面光強度や栄養塩フラックスについては、それぞれ水深や流速と強い多重共線性を持つため、一緒に分析することは避けるべきである。このように、生育評価基準値を算出する際にはコンブ生育に関わる環境要因のそれぞれの数的特性を良く見極めた上で解析を行う必要がある。

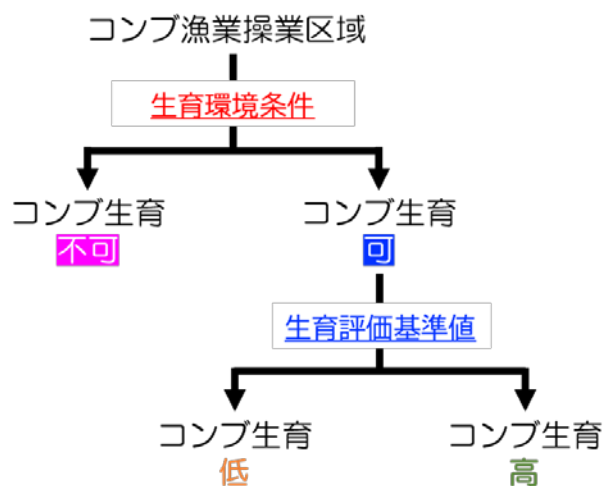


図 2-3-8. コンブの生育ポテンシャル評価のフロー

「生育環境条件」と「生育評価基準値」を用いて判別することにより、コンブ胞子体の生育が不可能な場所、高生育が期待される場所、高生育があまり見込めない場所に分けることができる。

参考文献

- 秋野秀樹 (2013) ; 磯焼け海域におけるホソメコンブ群落形成を促す栄養塩類の種類と流速に関する研究. 道総研中央水産試験場平成 24 年度事業報告書.
- 秋野秀樹 (2014) ; 道産コンブの生産安定化に関する研究. 道総研中央水産試験場平成 25 年度事業報告書.
- 馬場将輔・山本正之・渡辺幸彦 (2006) ; 流水式回流水槽によるワカメの水温と水流に対する生育反応. 海洋生物環境研究所研究報告 9: 55-64.
- Gerard V.A. (1997) ; The role of nitrogen nutrition in high - temperature tolerance of the kelp, *Laminaria saccharina* (Chromophyta). *Journal of Phycology* 33(5): 800-810.
- 川井唯史・金田友紀・桑原久実 (2000) ; 一様流下における流速とホソメコンブ配偶体生長の関係. In 日本水産工学会学術講演会学術講演論文集、日本水産工学会、pp. 79-80.
- 駒澤一郎・安藤和人・滝尾健二・川辺勝俊・坂西芳彦・横浜康継 (2010) ; 伊豆大島における暖海性コンブ目アントクメ群落の純生産量. *藻類* 58(3): 173-178.
- Mann K.H. (1972) ; Ecological energetics of the seaweed zone in a marine bay on the Atlantic coast of Canada. I. Zonation and biomass of seaweeds. *Marine biology* 12(1): 1-10.
- 名畑進一 (1989) ; コンブの遊走子の生態に関する研究-1-コンブの遊走子の定量法. 北海道立水産試験場研究報告 32: 11-17.
- 二村和視・岡本一利・高瀬進 (2006) ; 駿河湾深層水および表層海中でのサガラメ・カジメ幼体の生長に及ぼす流速の影響. *海洋深層水研究* 7(2): 7-11.
- 高谷義幸・秋野秀樹・四ツ倉典滋 (2016) ; リアルタイム PCR を用いたホソメコンブ遊走子の定量法 (技術報告). 北海道水産試験場研究報告 90: 13-16.

II-4. 生育適地選定、評価、対策の検討

対象コンブ種の生育段階ごとの生育環境条件（適地条件）に基づき、目標に合わせた適地の選定、生育ポテンシャルの評価と対策の検討を行う。

【解説】

対象海域の地理・物理的環境情報を GIS データベース化した後、造成・整備を行う規模に準じて漁場範囲（空間スケール）を定義し、漁場内の環境情報を収集する。その後、上記 II-3 で推定された各生育段階のコンブの生育と環境要因との関係式および生育環境条件（適地条件）、生育評価基準値に基づき、環境データからコンブの生育ポテンシャルマップを作成し、生育適地の選定および評価を行う。それらの選定・評価結果をもとに必要に応じて対策を検討する。

GIS による対象海域の地理・物理的環境情報の電子化

GIS を用いて適地選定・評価を行うためには、事前に対象海域の地理・物理的環境情報を電子化し、GIS 上でデータベース化しておく必要がある。「II-3-③ 漁場データを用いた胞子体の生育環境条件および生育評価基準値の推定」で記載した方法で対象海域についても地理・物理的環境情報を GIS データベース化する。既に、上記「II-3-③ 漁場データを用いた胞子体の生育環境条件および生育評価基準値の推定」において対象海域についても GIS データベースが作成されているのであれば、それを活用することができる。コンブの生育段階、造成・整備を行う規模に合わせて、漁場範囲（空間スケール）を定義し、各漁場内の環境情報を収集する。

配偶体の成熟ポテンシャルマップの作成

対象海域全体をグリッドに分割した後、各環境要因のラスターデータをポイントデータに変換し、グリッド内の栄養塩フラックス、水温、光量（光合成有効放射量）の平均値を演算する。コンブ配偶体の成熟には一定の光量が必要となるため、既存知見や「II-3-②-(1) 水温・光に対するコンブの成長特性の把握」の結果に基づき“配偶体の成熟に必要な光量”の条件を満たした海域のみを GIS で抽出する。抽出された海域について、「II-3-②-(2) 水温・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握」において得られた関係式と GIS 上で演算された栄養塩フラックス、水温の値からグリッドごとに配偶体の成熟率を算出し、GIS 上で色分けしてマッピングを行うことでコンブ配偶体の成熟ポテンシャルマップを作成する。

幼胞子体の成長ポテンシャルマップの作成

「II-3-②-(1) 水温・光に対するコンブの成長特性の把握」で推定されるコンブ幼胞子体の成長速度と水温、光量の関係式を用いて、GIS 上で演算された水温、光量のデータからグリッドごとに幼胞子体の成長速度を算出し、GIS 上で色分けしてマッピング（視

覚化)を行う。同様に、「II-3-②-(2) 水温・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握」および「II-3-②-(3) 流速・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握」で作成されるコンブ幼胞子体の成長速度と栄養塩フラックスの関係式と対象海域における栄養塩フラックス値のデータから、グリッドごとに幼胞子体の成長速度を算出し、GIS上にマッピングする。上記のように作成された2つのマップを統合し、幼胞子体の成長ポテンシャルマップを作成する。

大型胞子体の成長ポテンシャルマップの作成

対象海域全体をグリッドに分割し、各環境要因のラスターデータをポイントデータに変換し、グリッド内に分布するそのポイントデータの平均値及び最大・最小値などを演算する。その値を用いて、「II-3-③ 漁場データを用いた胞子体の生育環境条件および生育評価基準値の推定」において推定した「生育環境条件」および「生育評価基準値」に基づき、それぞれのグリッドについてコンブ胞子体の生育が不可能な場所(生育不可グリッド)、高生育が期待される場所(高生育グリッド)、高生育が見込まれない場所(低生育グリッド)に分け、GIS上で色分けしてマッピングを行うことでコンブの大型胞子体の生育ポテンシャルマップを作成する。

生育適地選定・評価と対策の検討

ここでの生育適地とは、コンブの全ての生育段階において好適な環境が整っている場所を指す(図2-4)。コンブの各生育段階におけるポテンシャルマップを確認し、コンブの増殖、漁場造成・管理、環境整備等の目的に合わせて適地を選定する。一方、生育不適地と判定された場所については、ポテンシャルマップ作成の過程で作られる各種環境マップを参照することでコンブの生育条件として不足している環境要因を把握(評価)



図2-4. 適地選定・評価のイメージ

することができ、環境改善策の検討が可能となる。

コンブの生育を阻害する要因として、物理的要因と生物的要因が考えられる。各要因と対策について表 2-4 に示す。漁場造成・管理によりコンブが繁茂した後、長期間にわたってコンブ藻場を維持するためには、対象コンブ種を含めた海藻類や食害生物のモニタリングを定期的実施し、必要に応じて競合生物、食害生物の除去などのメンテナンスを行う必要がある。漁場の造成や環境整備を目的として漁礁等の人工構造物を設置する場合には、このようなメンテナンスがしやすい構造となるように十分に配慮すべきである。

表 2-4. 天然コンブ生育における制限要因と対策の概要

要因	生育制限要因	原因	対策
物理環境要因	光量不足	・濁り(浮遊粒子、浮泥、プランクトンの増加) ・日照不足	基質面の嵩上げによりコンブの生育に必要な光量を確保(海底の嵩上げ、嵩上げ礁の設置等)
	高・低水温	・気象および気候変動 ・局所的な海況(暖水塊の接岸等)	海水交換を促進し、気温による影響の低減や低温の深層水の湧昇を促進(海底の嵩上げ、潜堤、マウンド礁の設置等)
	栄養塩不足	・海況、海流の流路など ・陸水の減少 ・流動環境の変化	コンブの栄養塩吸収効率の向上を図るために、海水交換、底面流速の増大を促進(海底の嵩上げ、潜堤、マウンド礁の設置等)
	基質面不足、不安定化	・浸食、砂泥の堆積、洗掘による基質の埋没など	コンブが着生・生育できる基質面を確保し、底質の安定化を図る(基質面高の調整、ブロック・石材、人工礁の設置など)
生物環境要因	遊走子の供給不足	・母藻の減少 ・漁場周辺の流況	母藻の保護(保護区の設定) スポアバッグの設置
	食害の増加	・植食動物(ウニ類)の増加	定期的な食害動物の除去
	競合種の増加 (光、栄養塩、基質)	・大型海藻、海草、微細藻類の増加(光、栄養塩、基質面の競合) ・付着動物の増加(基質面の競合)	定期的な競合種の除去(雑海藻駆除、付着物除去)

Ⅲ. 天然コンブの生育適地選定・評価の事例（ナガコンブ）

本章では、コンブの中で天然漁獲量が最も多いナガコンブについて、北海道東部太平洋沿岸に位置する根室市落石地先で実施した各種調査、適地選定・評価の取り組みを以下に示した。

Ⅲ-1. 現況把握

(1) 生物調査

落石地先とその周辺海域におけるナガコンブ漁期前調査データ（11年分）を収集し、データの有無を年・漁場別にまとめ一覧表にし、5ヶ年以上のデータ蓄積のある漁場を計58漁場リストアップした（表3-1-2）。各漁場について、コンブの生育に係る葉長、葉幅、全重量、肥大度などのパラメーターと位置情報、漁場範囲を整理したデータセットを作成し、コンブの生育を示すパラメーターの選定および生育環境条件、生育評価基準値の推定のための基礎資料とした。本海域では、ウニ類等による顕著な食害は確認されておらず、コンブの生育制限要因となっているとは考えられないことから動物に関する調査は実施しなかった。

漁場番号	漁場名	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28
1	乱橋	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○
2	田中	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	X
3	取が石	○	○	○	X	○	○	○	X	X	○	○
4	ヤブニ	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○
5	立野	X	○	○	○	○	X	○	○	X	X	X
6	カブ島	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	鹿りズブ	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	ガツク島舞	X	○	○	○	X	X	○	○	○	○	X
9	戸田	X	○	X	X	○	○	○	○	○	X	X
10	シロク	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○
11	中の洞窟舞	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○
12	極井ズブ	○	○	X	X	○	○	○	○	X	X	X
13	岸根ヤ	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	X
14	7枚おり	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○	○
15	ボンコタン	○	○	X	○	○	○	○	X	X	X	X
16	マツカ岩東	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	マツカ岩西	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○
18	玉藤の浜	X	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○
19	木村	X	○	X	○	○	○	X	○	○	X	○
20	玉藤の岬	○	○	X	X	○	○	○	○	○	○	○
21	宇上	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X
22	沖島辺川	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X
23	マルスの瀬	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
24	マンジュウ岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	真コオリ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	早勢の岬	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○
27	共和小学校	○	○	○	○	X	○	○	○	○	○	X
28	クロサワ	○	○	○	○	○	○	X	○	○	○	X
29	オッキイ浜	○	○	○	○	○	X	○	○	X	X	X
30	上野	○	○	○	X	○	○	○	X	○	○	X
31	ゴメ島架知	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
32	ペロ瀬	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
33	ドンジャ島	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
34	ナヤバ	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
35	サラシ	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○
36	ズブ石	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○
37	小島	○	X	○	X	X	○	○	○	○	○	X
38	キノコ岩	○	○	○	X	○	X	○	○	○	○	○
39	カネ岩	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○
40	昆布盛山中	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
41	平磯	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
42	二つ岩	○	X	○	X	○	○	○	○	○	X	X
43	浜松山中	○	X	X	○	○	○	○	○	○	X	X
44	埋の尻	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
45	玉ボンシ岩	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○	X
46	ナガオリ	X	X	X	X	○	○	○	○	X	X	○
47	バラバラ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X
48	坂下端下	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
49	ゴウゲン崎	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X
50	赤灯台	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○
51	立岩	○	○	○	X	○	○	○	○	X	○	○
52	三疊岩	○	○	X	X	○	X	○	X	X	X	○
53	メガネ岩	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X
54	がけの浜	○	○	X	X	○	○	X	○	X	X	X
55	汐原大	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X
56	汐原小	X	○	○	X	○	○	○	○	X	X	○
57	外浜港の下	○	○	○	○	○	X	○	○	○	○	○
58	アノマガリ	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○

表 3-1-2. 根室市周辺漁場におけるナガコンブ漁期前調査データの有無。11年間で5ヶ年以上調査の行われている計58漁場をリストアップした。

(2) 環境調査

対象海域である根室市落石地先とその周辺海域において（図 3-1-1）、光環境、水温の機器観測を実施するとともに、定期的に海水を採取し、海水中の栄養塩濃度の分析を行った。海底地形については、漁場基本図をスキャンして GIS に取り込んだ後、GIS 上でプロットを打ちながら漁場の水深と底質を電子化した。電子化した水深データから傾斜度や傾斜角を算出するとともに、海底地形および波高データを用いて流動モデルから対象海域内の底面流速を計算し、生育適地選定・評価を行うための基礎資料とした。

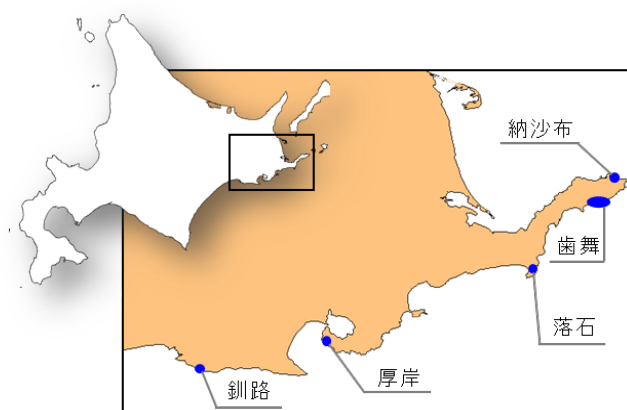


図 3-1-1. 調査海域図

納沙布、厚岸、釧路地先における日照時間、日平均光量子束密度および日積算光量子束密度[Thimijan and Heins (1983)に基づき、照度データを光量子束密度（波長領域：400-700 nm）に換算した後に算出]の結果について図 3-1-2 に示す。日照時間は 12～1 月に最短（約 10 時間）、6～7 月に最長（約 16 時間）となっている。日平均光量子束密度は、日々の天候に左右されるが 12 月に最小（500-550 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ）、1 月以降に上昇して 3～5 月に最大（約 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ）に達する（図 3-1-2）。日積算光量子束密度（月平均値）は、12 月に最低となった後、1～4 月に急激に増加し、5 月に最高値に達する（図 3-1-3）。春先は日積算光量子束密度の上昇が特に著しく、5 月には 12 月比で 3～4 倍の日積算光量子束密度に達する（図 3-1-3）。日積算光量子束密度の最大時期が日照時間の最大となる夏至頃（6 月）ではなく 5 月となるのは、6 月以降に度々発生する北海道東部太平洋沿岸特有の濃霧により光量（日平均光量子束密度、日積算光量子束密度）が低下するためと推察される。

海水中の DIN [硝酸態窒素 (NO_3) + 亜硝酸態窒素 (NO_2)] および二酸化ケイ素 (SiO_2) の濃度の変化を図 3-1-4 に示す。いずれの地先でも DIN と SiO_2 の濃度には季節変化が認められ、リン酸態リン (PO_4) については一部の地先を除き明瞭な変化は認められな

い (図 3-1-4)。DIN 濃度は、12~3 月には比較的高い水準を維持し、3~4 月に急激に濃度が低下した後は 8 月まで低い水準 (3 $\mu\text{mol/L}$ 以下) で推移する (図 3-1-4)。3~4 月に認められる DIN および SiO_2 濃度の急激な低下は、春先の植物プランクトンの大規模増殖 (春季ブルーム) により海水中の窒素、ケイ素が急速に利用されるためと考えられる。DIN は、地先間でも動態が大きく異なることからコンブの生育に影響を与えている可能性も想定される。

調査期間中の水温の変化を図 3-1-5 に示す。調査海域では 2 月に最低 (-1~0°C)、8~9 月に最大 (15~18°C) となる。10~11 月には水温の地域差はほとんど認められないが、春から秋は変動が大きく、地域差も認められる。

本調査の結果から、コンブが生育する沿岸域の海洋環境は地先ごとに異なり、コンブの生育、漁場の形成に関与している可能性が想定される。コンブの生育適地選定を行う場合には、対象海域における海洋環境の時空間的な変動を十分に考慮する必要がある。

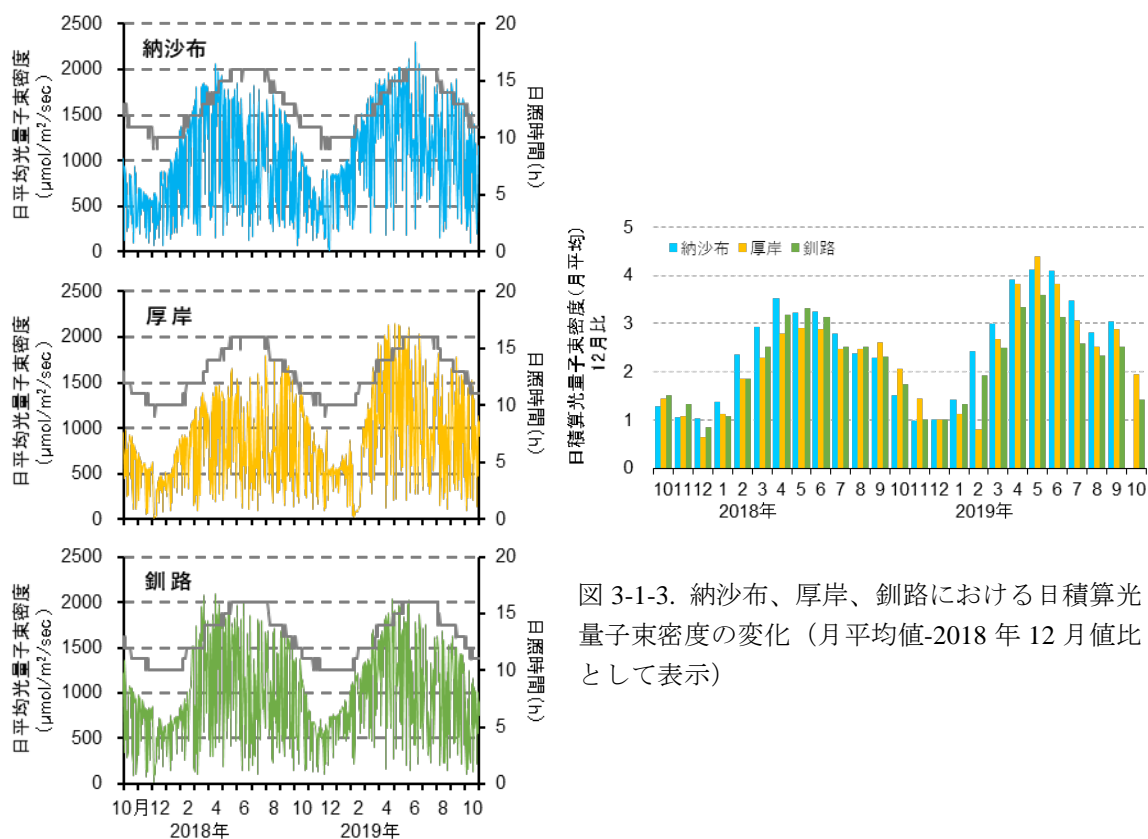


図 3-1-3. 納沙布、厚岸、釧路における日積算光量子束密度の変化 (月平均値-2018 年 12 月値比として表示)

図 3-1-2. 納沙布、厚岸、釧路における日平均光量子束密度、日照時間

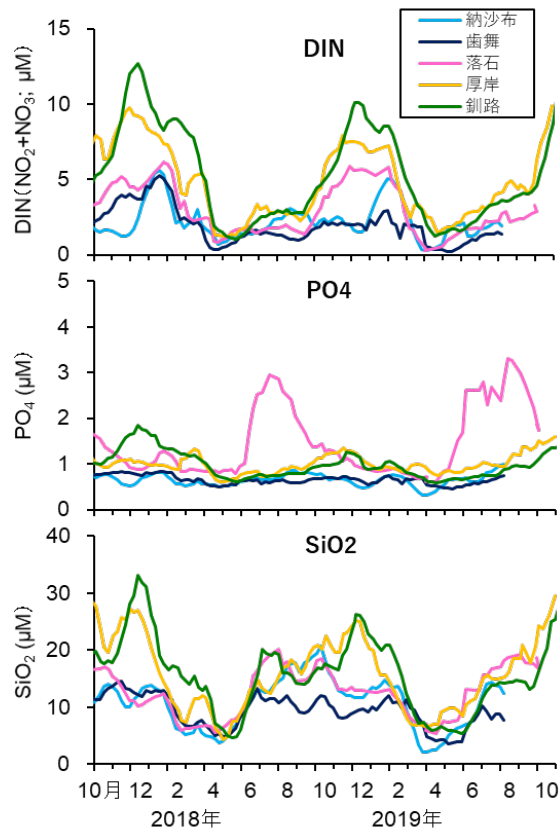


図 3-1-4. 納沙布、齒舞、落石、厚岸、釧路における DIN、PO₄、SiO₂ 濃度の変化 (5 週移動平均値で表示)

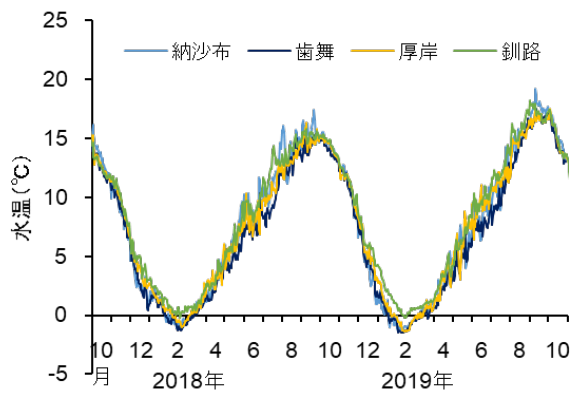


図 3-1-5. 納沙布、齒舞、厚岸、釧路における海水温の変化

参考文献

Thimijan R.W., Heins R.D. (1983) ; Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion. HortScience 18(6): 818-822.

Ⅲ-2. 生育環境条件（適地条件）の検討

ナガコンブの各生育段階における生育環境条件（適地条件）を推定するため、①遊走子の放出時期、分布パターンの把握、②幼孢子体の生育に必要な環境条件の推定、③大型孢子体の生育に必要な環境条件の推定を行った。

① 遊走子の放出時期、分布パターンの把握

コンブの遊走子量の季節変化を把握するために、落石海域の3定点（図 3-2-1：St. A、B、C）において毎月1回表面海水を採取し、海水に含まれるコンブの遊走子量を調査した。ナガコンブ遊走子の空間分布を把握するために、遊走子放出の最盛期と考えられる9月に計30地点（図 3-2-1：赤丸印の地点）で海水を採取し、遊走子量を推定した。採取した海水に含まれる遊走子量は、コンブの孢子体発生数を計数する培養法（名畑 1989）と、ナガコンブの DNA 量を定量分析するリアルタイム PCR 分析法（以下、PCR 法）（高谷ら 2016）により推定された。コンブ藻場から定期的にナガコンブ孢子体（2年目）を採集し、葉長、全重量の測定と成熟状況（子嚢斑の有無）の確認を行い、遊走子の放出状況と比較した。

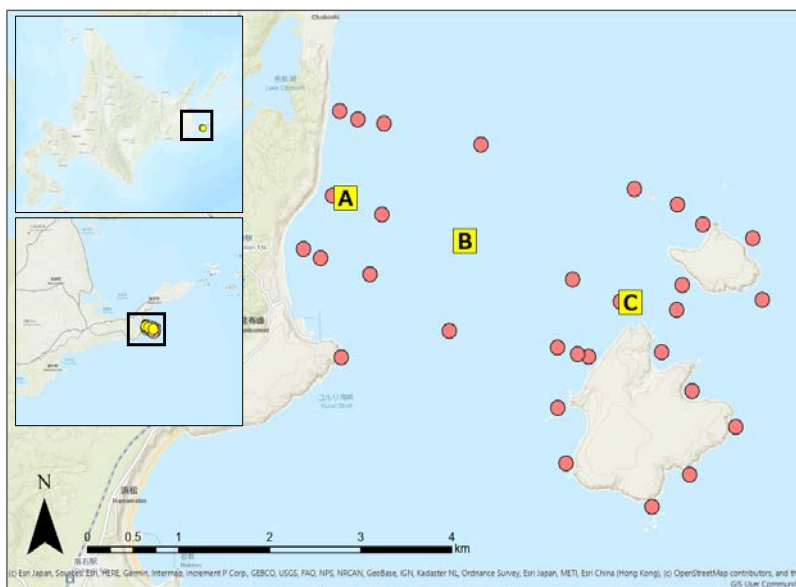


図 3-2-1. 根室市落石の調査点。St. A：藻体採集地点。
St. A～C：調査定点、赤丸：空間分布調査の定点

葉状体の表面に子嚢斑を形成(成熟)していた個体は7月から11月に多く認められ、9~11月はほぼ全ての個体が成熟していた。一方、冬から春に子嚢斑を形成する個体は少なかった(図3-2-2)。

培養法とPCR法により推定されたSt. Cにおけるコンブ遊走子量の変化を図3-2-3に示す。遊走子は、冬から春にかけてはほとんど認められず、初夏から初冬にかけて検出された(図3-2-3)。ナガコンブの子嚢斑形成時期と遊走子の出現時期とが一致していたことから、本海域におけるナガコンブの遊走子の放出時期は7~11月であると考えられる。

コンブの遊走子は、一年を通して岸に近い地点(St. A、C)で多く、岸から離れた海峡部のSt. B地点では少なかった(図3-2-4)。空間分布調査においても、ナガコンブのDNAは母藻のある岸に近い場所で多く検出され、岸から遠い調査点で少ない傾向が認められた(図3-2-5)。これらの結果から、遊走子の分布は母藻となるコンブ藻場の分布と関連しており、藻場の近くに多く出現し、藻場から離れた海峡部などでは少ないと考えられる。生育適地選定・評価を行う際には、このような遊走子の時空間的な分布の特徴を十分に考慮する必要がある。

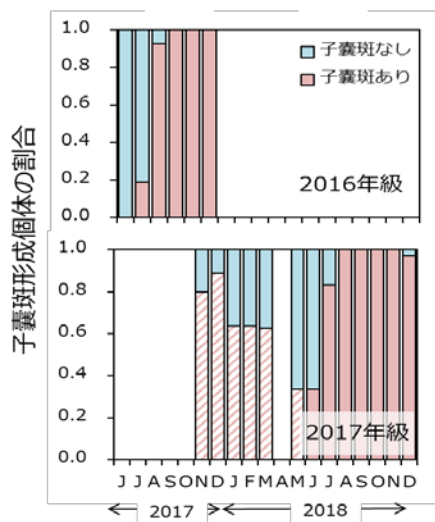


図3-2-2. 落石地区で採集したナガコンブの子嚢斑形成個体の割合(年級別) 青色は2016年級、赤色は2017年級。

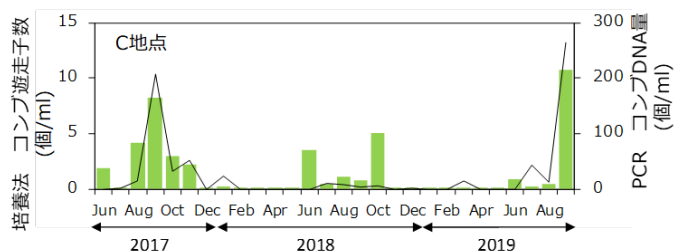


図3-2-3. St. Cにおけるコンブの遊走子数(棒グラフ)とナガコンブのDNA量(折れ線)の変化。

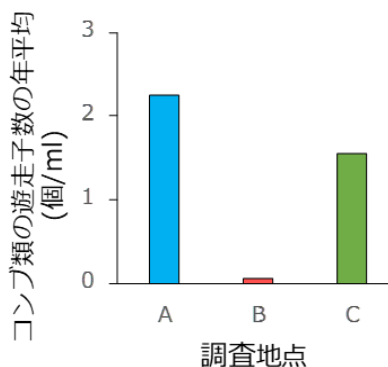


図3-2-4. 各調査定点におけるコンブ遊走子の年平均密度(培養法)

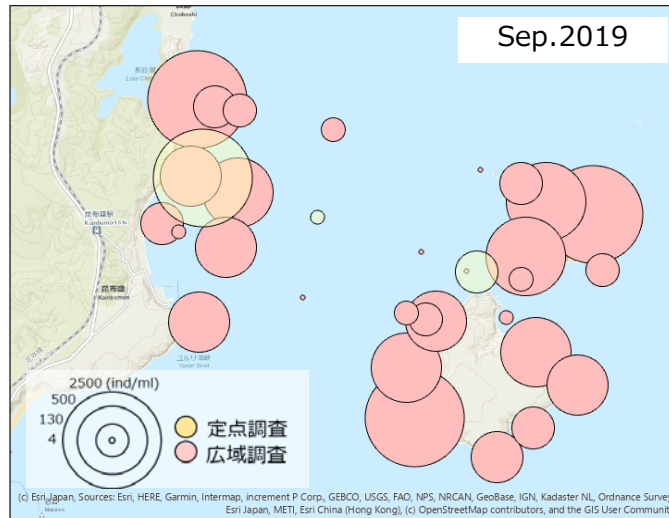


図 3-2-5. 落石海域の海水に含まれていたナガコンブの遊走子の DNA 量 (2019 年 9 月)

② 配偶体、幼孢子体の生育に必要な環境条件の推定

ナガコンブの配偶体、幼孢子体の生育に必要な環境条件を推定する目的で、水温、光、栄養塩および流速を変化させた条件下で飼育試験を行い、上記要因が幼孢子体の成長に及ぼす影響について検討した。

根室市落石地先において採集したナガコンブから得た遊走子を含む滅菌海水をカバーグラスに滴下し、配偶体を得た。また、この配偶体の着生したカバーグラスを 10℃、30~80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 、10L:14D、栄養強化海水の環境下に置き、成熟・受精させて幼孢子体（葉長 2~3 mm 程度）まで育成した。水温、光、栄養塩および流速の変化がナガコンブの生育に及ぼす影響を把握するため、育成した配偶体、幼孢子体を用いて以下の (1)、(2)、(3) の飼育実験を行った。

(1) 水温・光に対するコンブの成長特性の把握

窒素濃度 6 $\mu\text{mol}/\text{L}$ に調整し、その他の栄養塩類は十分に強化した滅菌海水とナガコンブ幼孢子体が着生したカバーグラスをシャーレに入れ、5℃、10℃、13.5℃、17℃、20℃の 5 温度条件、15、30、50、130 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ の 4 光条件を組み合わせた計 20 条件（図 3-2-6）で飼育試験を実施した。以下の式 (1) より相対成長速度（以下 RGR）を実験条件ごとに算出した。

$$\text{RGR} = \{\ln(\text{Le}) - \ln(\text{Ls})\} / d \quad (\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}) \quad \dots \text{式 (1)}$$

Ls: 試験開始時のコンブの葉面積、Le: 試験終了時のコンブの葉面積、d: 培養日数、ln: 自然対数

培養水温と光量、相対成長速度の関係を図 3-2-6 に示す。試験の条件設定の範囲において、水温が低く、光量が多い試験区でナガコンブの相対成長速度が高い傾向が認められた。水温 5°C、光量 130 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ の試験区で相対成長速度が最も高く、水温の高い試験区では同じ光量でも相対成長速度は低くなった。

重回帰分析を行った結果、決定係数（自由度調整済）は 0.39 であった。水温よりも光量の影響度が大きく、光量の標準偏回帰係数は 1%水準で有意であった ($p = 0.003$)。また、回帰モデル式が作成されたことで、任意の水温、光量における幼孢子体の相対成長速度の推定が可能となった。

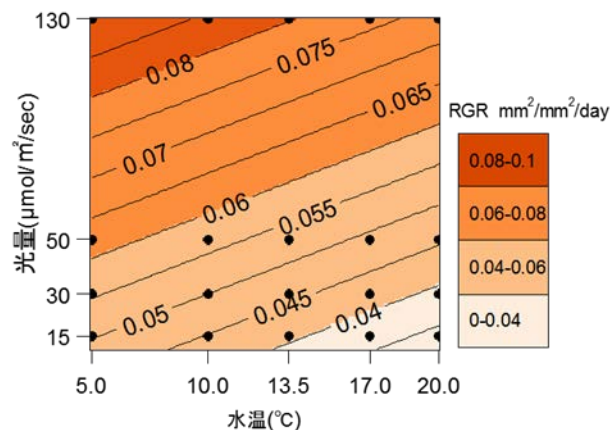


図 3-2-6. 培養水温及び培養光量とナガコンブの相対成長速度 ($\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}$) との関係
重回帰分析により得られた水温と光量の偏回帰係数を用いて相対成長速度の推定値を再計算した。

(2) 水温・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握

水温 1、5、10、15、20°C に設定した恒温槽のそれぞれに、硝酸体窒素濃度を 1、5、10 $\mu\text{mol}/\text{L}$ に調整した滅菌海水を満たしたフラスコを設置し、ナガコンブ幼孢子体を各フラスコに 4~5 個体ずつ入れて水温・硝酸体窒素濃度の条件を組み合わせた 15 通りの実験区を設定した (図 3-2-7)。光量 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 、明暗周期 12L : 12D、通気条件の下で培養試験を行った。培養海水は、3~4 日ごとに硝酸体窒素濃度を調整した滅菌海水と交換した。各水温・硝酸体窒素濃度に幼孢子体を 1 週間馴致し、試験開始 7 日目を開始日として、7 日目と 10 日目に幼孢子体を撮影した。画像計測ソフトにより個体

ごとに葉面積を求め、上記の式（1）より相対成長速度を実験区ごとに算出した。

培養水温と相対成長速度の関係を硝酸体窒素濃度別に図 3-2-7 に示す。幼胞子体の相対成長速度は、硝酸体窒素濃度が 1 $\mu\text{mol/L}$ では 5 $^{\circ}\text{C}$ 、5 $\mu\text{mol/L}$ 、10 $\mu\text{mol/L}$ では 10 $^{\circ}\text{C}$ で最大となった。硝酸体窒素濃度が低い条件下では、幼胞子体の相対成長速度が最大となる水温が低下する傾向が認められた。ナガコンブの生育海域では、春期ブルーム以降は栄養塩がほとんど枯渇することから、高水温かつ貧栄養になる夏期には幼胞子体の相対成長速度が大きく低下することが想定される。

図 3-2-7 の結果を元に、水温と硝酸体窒素濃度を説明変数、相対成長速度を応答変数として重回帰分析を行った。水温と相対成長速度との関係については 2 次関数モデル、硝酸体窒素濃度と相対成長速度との関係については 1 次関数モデル式を作成し、任意の水温、硝酸体窒素濃度における幼胞子体の相対成長速度の推定が可能となった（図 3-2-8）。

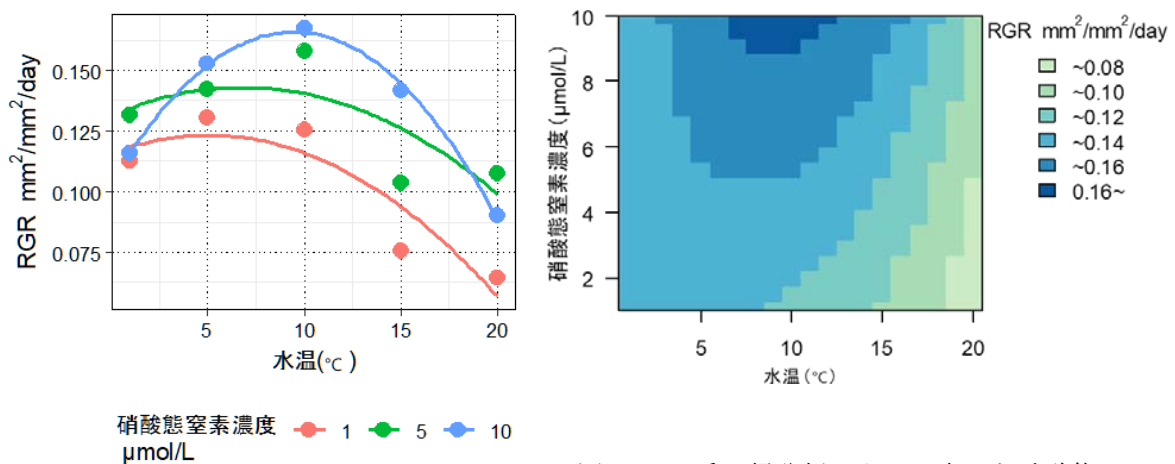


図 3-2-7. 培養海水中の硝酸体窒素濃度別の培養水温と相対成長速度との関係

図 3-2-8. 重回帰分析によって水温と硝酸体窒素濃度に対する相対成長速度の分布をモデリングした結果

（3）流速・栄養塩に対するコンブの成長特性の把握

水温 10 $^{\circ}\text{C}$ に設定した水槽を 4 つに仕切り、出力の異なる水中ポンプを設置して流速を 30、15、5、0 cm/s に調整した 4 実験区を設定した。

流速と配偶体の成熟率との関係

上記の各実験区に配偶体の着生したカバーガラスを設置し、光量 100 $\mu\text{mol/m}^2/\text{sec}$ 、明暗周期 12L : 12D、硝酸体窒素濃度 5 μM の条件下で飼育試験を実施した。培養開始時

と 12 日目に、カバーグラスを取り上げて実体顕微鏡下で配偶体を撮影した後、配偶体の細胞の成熟・未成熟を計数し、成熟率を算出した。各試験区における配偶体の成熟率を目的変数、流速と栄養塩濃度を乗じたフラックス値を説明変数としてロジスティック曲線に当てはめ、成熟率が 50%となるフラックス値を求めた。

栄養塩フラックスと配偶体成熟率の関係を図 3-2-9 に示す。フラックス値の上昇とともに配偶体の成熟率は高まった。フラックス値が 0 でも成熟が認められる(成熟率 0.26)のは、栄養塩が流速に依らない拡散によって配偶体に供給されたためと考えられる。半数の配偶体が成熟するフラックス値は 34.7 であった。栄養塩のフラックス値とコンブ配偶体の成熟率の関係式が得られたことで、任意の栄養塩フラックス値からの配偶体の成熟率の推定が可能となった。

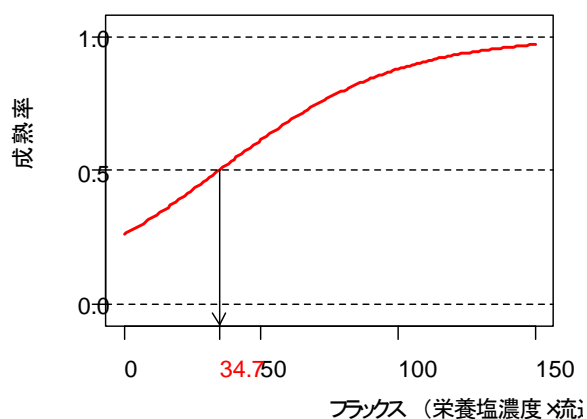


図 3-2-9. 栄養塩フラックスと配偶体成熟率の関係

流速と幼孢子体の成長速度との関係

上記の各実験区に幼孢子体の着生したカバーグラスを設置し、光量 $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 、明暗周期 12L : 12D、硝酸態窒素濃度 $10 \mu\text{M}$ の条件下で飼育試験を実施した。培養開始時と 8 日目に幼孢子体を撮影し、画像計測ソフトで幼孢子体の葉面積を求めた。面積から上記の式(1)により相対成長速度を実験区ごとに算出した。培養流速を説明変数、得られた相対成長速度を応答変数として回帰分析を行い、パラメーターの推定およびモデル式の作成を行った。

培養流速と幼孢子体の相対成長速度の関係を図 3-2-10 に示す。ナガコンブの相対成長速度は 流速 15 cm/s で最大値を示した。流速による成長促進効果は、栄養塩フラックスの増大によるものと想定し、コンブ幼孢子体の栄養塩吸収速度を上回るフラックスに達すると成長速度は飽和すると仮定した。得られた流速と相対成長速度の関係をミカエリス-メンテン式に回帰させてモデル式を作成し、任意の流速における幼孢子体の相対

成長速度の推定が可能となった。相対成長速度の最大値は 0.25、成長速度が最大成長速度の 1/2 になる流速は 7.8 cm/s と推定された。

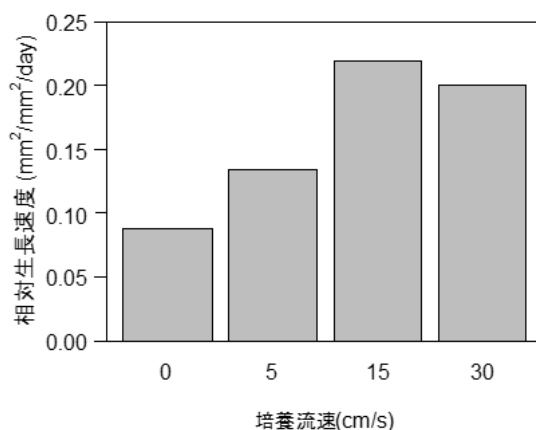


図 3-2-10. 培養流速と相対成長速度との関係

③ 大型孢子体の生育に必要な環境条件の推定

生育適地選定および生育ポテンシャル評価に必要な生育環境条件を設定するために、コンブ孢子体の成長と物理環境との関係性について検討し、その関係を踏まえた上で漁場情報・データを用いた統計解析により孢子体の生育環境条件および生育評価基準値を推定した。

孢子体の成長・成熟と海洋環境との関係性の把握

コンブ孢子体の生育と海洋物理環境との関係性を把握するために、天然海域から採集してきたナガコンブ（2年目）の藻体を自然環境に近い条件下で飼育した（図 3-2-11）。採集したコンブを飼育水槽に収容する前に葉長、葉幅、湿重量および子嚢斑の有無を測定し、葉状体に一定間隔で穴を開けた。飼育期間中は、1～2週間毎にコンブ葉状体の長さ、幅を測定するとともに、子嚢斑形成の有無を確認した。藻体に開けた穴の移動距離を測定し、ナガコンブ2年目葉の平均成長速度と未枯れ速度を算出した。自記式記録計により水槽内の水温、照度を継続的に測定するとともに、定期的に水槽内の海水を採取して機器分析により栄

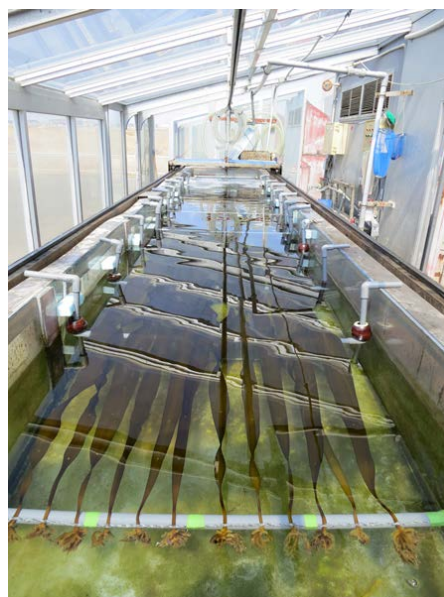


図 3-2-11. ナガコンブ飼育実験の様子

養塩（硝酸態窒素 NO_3 、亜硝酸態窒素 NO_2 、リン酸態リン PO_4 ）の濃度を測定した。コンブの成長・成熟と光環境、水温、栄養塩のデータを比較し、コンブの生育と環境との関係性について検討した。

ナガコンブの成長速度と水槽内の各環境要因の変化を図 3-2-12 に示した。1 月から 5 月にかけてのナガコンブの成長（伸長）速度の増加は、日積算光量子束密度の上昇と良く一致しており、成長速度が最大になる 3～5 月には日積算光量子束密度も最大となっていた（図 3-2-12）。これらの結果から、ナガコンブ胞子体の成長速度は、光量に大きく左右されると考えられる。海水中の DIN は、コンブの成長が最大になる時期に最も低い水準であったことから、ナガコンブは海水中的 DIN 濃度が高い秋から冬に葉状体内に窒素を貯留し、4 月以降海水中的の窒素濃度が低下した後に成長に利用していると考えられる（図 3-2-12）。したがって、秋季から冬季（前年 11 月～当年 3 月）の海水中的の DIN 濃度と当年 1～5 月の光量がナガコンブ胞子体の生育に大きな影響を及ぼすと想定される。このように、環境要因ごとにコンブの生育に作用する時期が異なるため、対象コンブ種の生育環境条件、生育評価基準値を推定する場合には、事前にコンブ生育と各環境要因の関係を把握した上で、生育に影響を及ぼす環境要因・時期のデータのみを選んで解析に用いる必要がある。

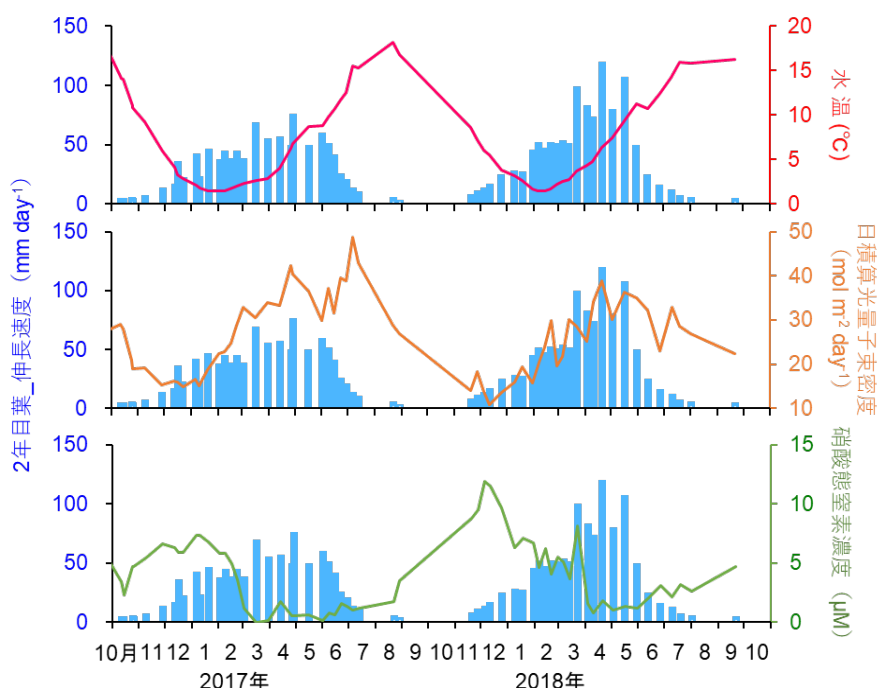


図 3-2-12. ナガコンブ（2 年目）の成長（伸長）速度および飼育水槽内の水温、日積算光量子束密度、硝酸態窒素濃度の変化

漁場データを用いた胞子体の生育環境条件および生育評価基準値の推定

ナガコンブ生育の可否に関わる環境条件（生育環境条件）の抽出に向けて、空間解析によって水深、底質及び傾斜度に関するラスタデータを生成し、GISに格納した。漁場の位置情報にもとづきGIS上に漁場をプロットし、半径250mの円形の漁場範囲を設定した。ナガコンブ生育に関わる基本的な環境条件として水深、底質、傾斜度及び底面流速に絞り、空間解析により各漁場の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度及び平均底面流速を演算した。その後、漁場間で共通する環境要因を抽出してナガコンブ胞子体の生育環境条件とした（表3-2-1）。ナガコンブの生育環境条件は、平均水深8m以浅、底質2以上（主に岩盤）、平均傾斜度4°未満、最大傾斜度40°未満および平均底面流速30cm/s以上85cm/s未満であると推定された。

表3-2-1. 落石周辺海域におけるコンブ漁場の環境要因およびナガコンブ胞子体の生育環境条件

Site No.	Site	平均水深	平均傾斜度	最大傾斜度	平均底質	平均底面流速	Site No.	Site	平均水深	平均傾斜度	最大傾斜度	平均底質	平均底面流速
		Int	(°)	(°)	(1.23)	(cm/s)			Int	(°)	(°)	(1.23)	(cm/s)
		Mean	Mean	-	Mean	Mean			Mean	Mean	-	Mean	Mean
1	乱橋	55	2.1	12.9	3.0	57.0	36	スブ石	2.2	1.0	7.6	2.3	58.2
2	田中	4.2	1.0	8.2	3.0	64.3	37	小島	3.3	1.2	17.1	2.7	30.7
3	取戸石	3.3	0.3	3.6	3.0	72.1	38	キノコ岩	3.3	2.0	15.5	2.7	35.2
4	ヤマニ	3.8	2.3	14.0	3.0	69.4	39	カモ岩	5.1	3.7	34.6	2.9	31.1
5	立野	1.8	0.7	6.0	3.0	74.7	40	雲形山山	5.8	3.4	34.4	3.0	56.0
6	カブ島	1.9	1.2	22.3	3.0	81.2	41	平磯	2.4	1.2	9.5	3.0	57.7
7	走りズブ	1.5	0.4	3.7	2.1	74.9	42	二つ岩	4.4	2.2	15.4	3.0	49.3
8	ガッハ歯舞	3.6	0.8	5.9	3.0	72.2	43	浜松山中	4.4	2.1	15.1	3.0	65.7
9	戸田	1.7	0.5	3.6	3.0	75.6	44	煙の尻	4.6	2.3	11.2	3.0	47.0
10	シノク	4.3	2.5	15.6	3.0	75.7	45	エボシ岩	3.8	2.8	25.9	3.0	53.1
11	中の瀬歯舞	2.2	0.8	6.5	3.0	56.4	46	ナガオリ	2.7	1.4	12.2	3.0	66.6
12	桜井ズブ	2.8	0.9	14.8	3.0	47.8	47	バラバラ	4.4	2.6	19.1	3.0	69.7
13	屋根ヤ	3.3	2.1	15.4	3.0	69.7	48	波の下流の下	2.9	1.8	10.7	3.0	67.0
14	7枚オリ	4.8	0.8	10.7	3.0	54.0	49	ゴウケン崎	3.3	2.6	28.5	3.0	73.2
15	ボンコタン	3.9	1.2	9.0	3.0	68.0	50	赤灯台	4.4	2.9	34.9	2.8	43.8
16	マツカ岩	1.4	0.5	7.2	2.9	74.2	51	立岩	4.5	2.0	24.3	2.9	42.3
17	マツカ岩西	2.3	0.8	5.2	1.9	82.6	52	三隻浜	3.1	0.2	2.3	3.0	56.3
18	工藤の瀬	1.3	0.3	3.3	1.1	56.2	53	メガネ岩	5.7	2.8	30.8	3.0	46.3
19	木村	4.6	2.2	13.9	2.9	66.6	54	かげの浜	3.2	0.3	2.1	3.0	50.7
20	工藤の岬	7.6	4.0	18.4	3.0	53.3	55	汐巻大	5.4	2.1	31.6	3.0	70.1
21	三上	2.5	1.0	8.3	2.3	76.1	56	汐巻小	3.7	1.8	37.6	3.0	70.2
22	沖根辺川	2.1	0.9	8.0	2.5	69.2	57	外浜の下	2.1	1.6	15.3	3.0	32.8
23	マルスの瀬	1.8	0.8	4.6	2.9	72.8	58	ナマナガリ	7.9	3.7	23.9	2.9	40.7
24	マンジュウ岩	3.5	1.8	11.6	3.0	67.2							
25	ヨコオリ	1.5	0.6	4.1	3.0	56.9							
26	早瀬の瀬	2.1	0.6	3.5	3.0	70.0							
27	共和小学校	2.0	0.8	5.5	3.0	63.7							
28	クロサワ	2.3	1.1	9.3	3.0	58.8							
29	オウキイ浜	4.5	2.9	17.5	2.5	52.5							
30	上野	1.8	0.8	4.6	2.9	51.0							
31	ゴメ島友知	4.3	3.2	16.0	3.0	59.4							
32	ヘロ瀬	2.1	1.2	9.2	3.0	47.8							
33	ドンジャ島	2.9	2.2	16.8	3.0	56.8							
34	ナヤバ	2.1	1.4	7.6	3.0	32.2							
35	サラシ	6.1	2.6	19.3	2.7	32.0							

ナガコンブ胞子体の生育環境条件

- ・水深 8m以浅
- ・平均傾斜 約4°まで
- ・最大傾斜度 約40°まで
- ・底質 主に岩盤(2以上)
- ・底面流速 30~85cm/s

※ 底質は数値が大きいほど岩盤質、小さいほど砂質であることを示す。

ナガコンブの高・低生育に関わる環境条件（生育評価基準値）を抽出するために、ナガコンブ漁期前調査から得た「コンブ生育の絶対評価値」（コンブの全長）、さらにそこから標準化した「コンブ生育の相対評価値」（コンブの平均全長順位/漁場数の11年間の平均値）と「コンブ生育の相対的なばらつき」（相対評価値の標準偏差）の3変数からクラスター分析(x-means法)を用いて、高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)の2つの漁場カテゴリーに分類した(図3-2-13)。「水深」、「底質」、「傾斜度」、「最大傾斜度」、「底面流速」、コンブ生育を左右する要因として抽出された「11月から3月までの積算栄養塩フラッ

クス値」および「1月から5月までの光量」（上記「孢子体の成長・成熟と海洋環境との関係性の把握」を参照）について漁場カテゴリ間で比較した結果、高生育漁場(C1)は低生育漁場(C2)よりも底面流速が速く、11月から3月までの積算栄養塩フラックスが高かった(表 3-2-2)。これは栄養塩フラックスに関わる底面流速がコンブ生育に大きな影響を与えていることを示している。高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)の決定要因について、水深、底質、傾斜度、最大傾斜度および底面流速の5変数に絞って決定木分析を行った。C1となる条件、C2となる条件、そしてC1とC2どちらにもなりうる環境条件を底面流速、底質および最大傾斜度から説明することができ、その閾値をナガコンブ孢子体の生育評価基準値とした(図 3-2-14)。この条件分けによって87.8%の漁場について高・低生育の判別が可能となった。このようにナガコンブ生育の可否に関わる環境条件(生育環境条件)とナガコンブの高・低生育を決める環境条件(生育評価基準値)を抽出することで、環境データからナガコンブ孢子体の生育ポテンシャルの評価が可能となる。

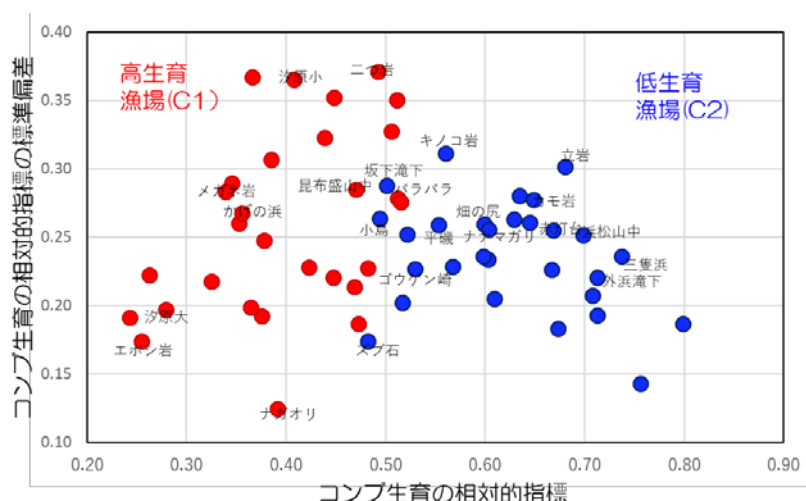


図 3-2-13. クラスタ分析による高生育・低生育漁場の類別。
高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)の2つの漁場カテゴリに分類できた。コンブ生育の相対評価値は、コンブの平均全長順位/漁場数の11年間の平均値から計算された。

表 3-2-2. 海底構造に関わる7変数のカテゴリ間比較 (One way-ANOVA)。

Variables	高生育漁場(C1) (n=29)		低生育漁場(C2) (n=29)	
	Mean (SD)	Mean (SD)	t	P
平均水深(m)	3.3 (1.3)	3.6 (1.7)	-1	0.601
積算底面光強度(1-5月) (E/m ² /month)	1261.6 (495.1)	1281.0 (499.6)	0.1	0.882
平均傾斜度(°)	1.5 (0.9)	1.7 (1.1)	0.8	0.412
最大傾斜度(°)	14.1 (9.9)	13.6 (8.9)	-0.2	0.839
平均底質(1,2,3)	2.9 (0.3)	2.8 (0.4)	-1	0.516
年平均流速(cm/sec)	64.0 (12.0)	54.1 (13.6)	-3	0.005
積算栄養塩フラックス(11-3月) (mmol/m ² /month)	38.8 (7.7)	34.3 (8.5)	-2	0.036

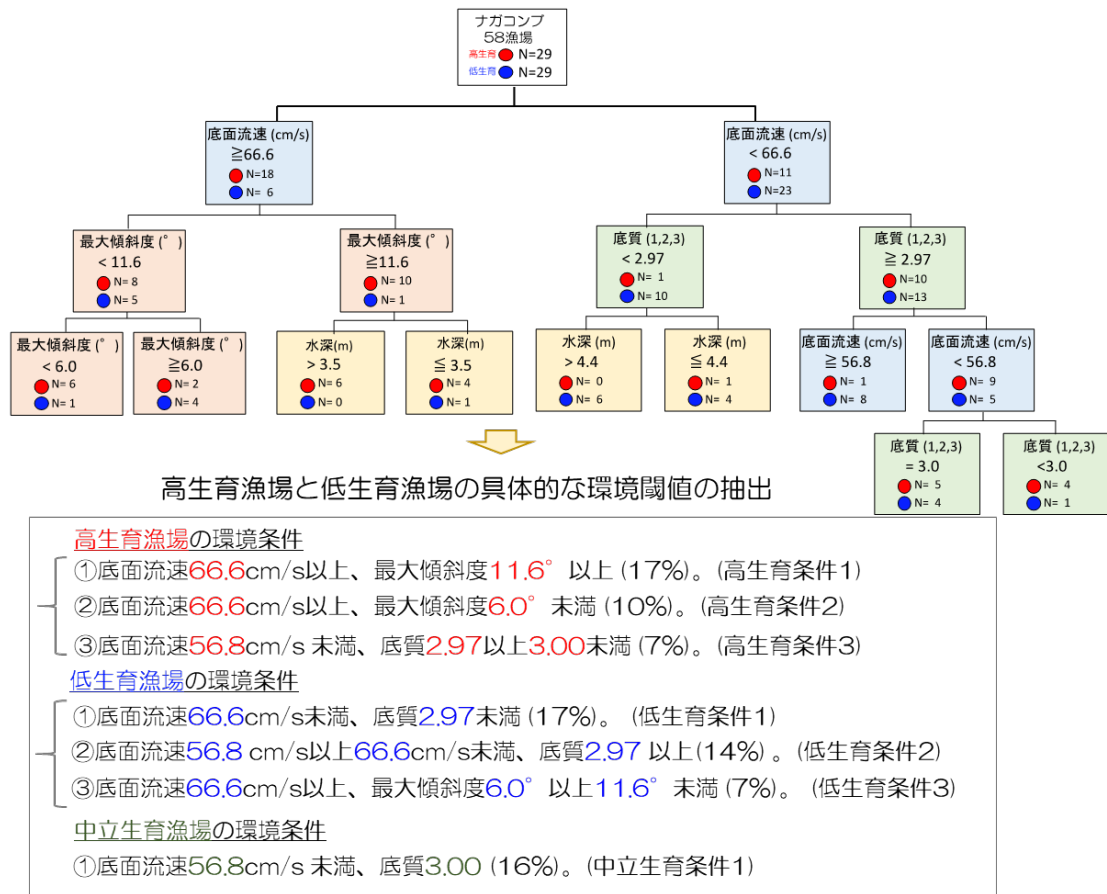


図 3-2-14. 高・低生育漁場条件判別を目的とした決定木分析の結果。ナガコンブの高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)を応答変数とし、平均水深、平均傾斜度、最大傾斜度、底質及び年平均流速の5つの変数を説明変数として、応答変数を説明変数で有意水準に基づいて分岐させた。

参考文献

【参考文献】

- 1) 名畑進一 (1989) コンブの遊走子の生態に関する研究(1) 第1報 コンブの遊走子の定量法. 北水試研報 32:11-17
- 2) 高谷義幸・秋野秀樹・四ツ倉典滋 (2016) リアルタイム PCR 法を用いたホソメコンブ遊走子の定量法 (技術報告). 北水試研報 90:13-16

III-3. 生育適地選定、評価

「III-2. 生育環境条件（適地条件）の検討」において推定したナガコンブの配偶体・幼孢子体の生育と環境要因との関係式、孢子体の生育環境条件、生育評価基準値に基づき、モデル海域である根室市落石地先の環境データから各生育段階のコンブの生育ポテンシャルマップを作成するとともに、生育適地の選定と漁場評価のための環境マップ作成を行った。各生育段階のポテンシャルマップおよび環境マップを合せて見ていくことで、ナガコンブの生育条件を備えた適地の選定や漁場管理方策の検討が可能となる。

配偶体の成熟ポテンシャルマップの作成

対象海域全体をグリッドに分割し、各環境要因のラスターデータをポイントデータに変換し、グリッド内の底面流速、光合成有効放射量（海底面推定値）の平均値を演算した。また、各グリッドにおける底面流速と各月の栄養塩濃度 [III-1. 現況把握 における環境調査データを使用] を掛け合わせて栄養塩フラックス値とした。海底面の光合成有効放射量が $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （ナガコンブ配偶体の成熟に必要な光量の下限值：秋野 2014）よりも高いグリッドのみを抽出した。III-2-②-(c)において得られた栄養塩フラックスと配偶体成熟率の関係式に基づき、9～12月の各月の栄養塩フラックス値から各グリッドにおけるナガコンブ配偶体の成熟率を算出し、GIS上で色分けして配偶体成熟ポテンシャルマップを作成した（図3-3-1）。成熟率は、岸に近い海域で高く（80～90%）、岸から離れると低下する傾向が認められたが、9～12月には多くの場所で50%を上回ると推定された。成熟率が80%以上に達すると推定された海域は、9月から11月にかけて拡大し、12月にはやや縮小する。このマップを参照することで、ナガコンブ配偶体の成熟の可能性が高い場所を容易に判断できる。

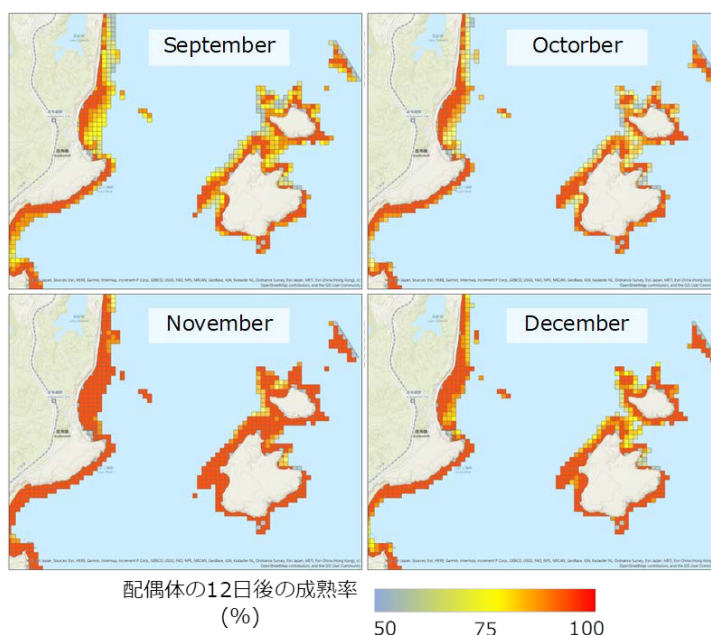


図 3-3-1. 落石海域におけるナガコンブ配偶体成熟ポテンシャルマップ。

幼胞子体の成長ポテンシャルマップの作成

海底面の光合成有効放射量が $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (ナガコンブ配偶体の成熟に必要な光量の下限値: 秋野 2014) よりも高いグリッドのみを抽出した。GIS 上で計算された水温、光合成有効放射量 (海底面推定値) を用いて、III-2-②-(a) で得られた水温・光量とナガコンブ幼胞子体の相対成長速度の関係式から、各グリッドにおけるナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 ($\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}$) を計算した。また、III-2-②-(c) で推定された栄養塩フラックスとナガコンブ幼胞子体の相対成長速度の関係式から、各月の栄養塩フラックスの値を用いてグリッドごとにナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 ($\text{mm}^2/\text{mm}^2/\text{day}$) を計算した。幼胞子体の一般的な出現時期 (9~12月) について、水温・光量および栄養塩フラックスからそれぞれ推定された幼胞子体の相対成長速度を GIS 上で色分けしてマッピング (視覚化) し、幼胞子体の成長ポテンシャルマップ (幼胞子体ポテンシャルマップ 1、2) を作成した (図 3-3-2、図 3-3-3)。水温・光量から推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度は、9月から12月にかけて増加し、12月は岸沿いの広い範囲で高くなった。栄養塩フラックスから推定した成長速度は、11月に最も高く、海域の中でも東~南に面した海岸域で特に高くなると想定される。幼胞子体の成長に好適な水温、光量、栄養塩フラックスの条件が整った場所 (適地) を把握するために、ポテンシャルマップ 1、2において、各月の相対成長速度が上位 25% 以内のグリッドを高成長グリッドとしてそれぞれから抽出し、月ごとに重ね合わせ、図 3-3-4 に示した。

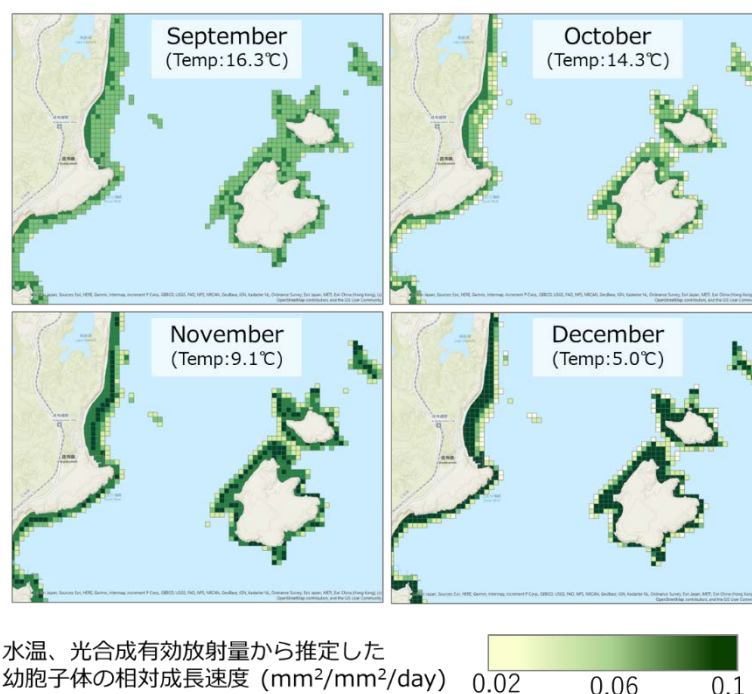


図 3-3-2. 平均水温、光合成有効放射量から推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 (幼胞子体ポテンシャルマップ 1)

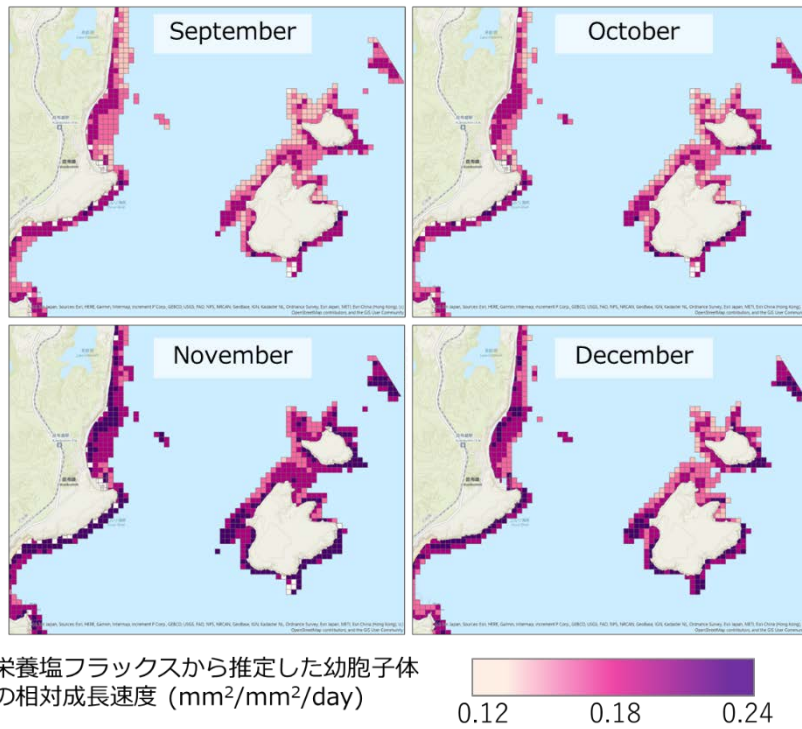


図 3-3-3. 栄養塩フラックスから推定したナガコンブ幼胞子体の相対成長速度 (幼胞子体ポテンシャルマップ 2)

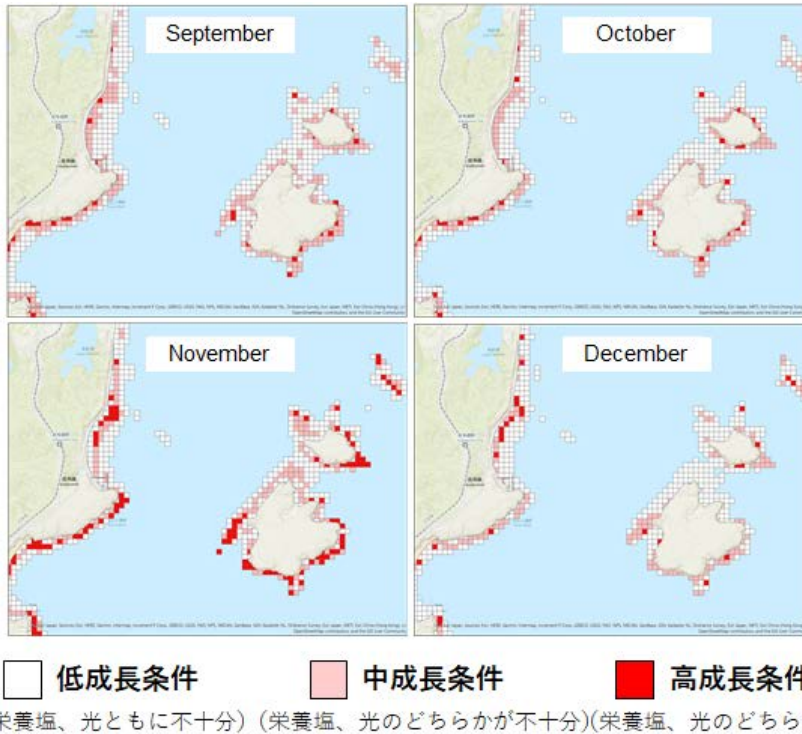


図 3-3-4. 落石海域における幼胞子体の成長ポテンシャルマップ
幼胞子体ポテンシャルマップ 1、2 から上位 25%の高成長グリッドを抽出し、マッピングを行った。

東～南側に面している海域でナガコンブ幼胞子体の相対成長速度が高くなることがわかる。月ごとに見ると、11月が最も広い範囲で幼胞子体の成長速度が高いことが視覚的に確認できる。

大型胞子体の成長ポテンシャルマップの作成

落石地区の漁業操業区域全体を100mグリッドに分割した後、各漁場環境要因のラスターデータをポイントデータに変換し、グリッド内の平均水深、平均底質、平均傾斜度、最大傾斜度および平均底面流速を演算した。ナガコンブ生育の可否に関わる環境条件（生育環境条件）とナガコンブの高・低生育に関わる環境条件（生育評価基準値）を統合し、閾値を決定した（表3-3-1）。その閾値にもとづいて、落石海域内にある全てのグリッドを「ナガコンブの生育に適さないグリッド」（生育不可グリッド）、「ナガコンブの高生育が期待されるグリッド」（高生育グリッド）、「ナガコンブの低生育が見込まれるグリッド」（低生育グリッド）そして「ナガコンブは生育するが高生育か、低生育が見込まれるかわからないグリッド」（中立生育グリッド）の4つに分類して、予測評価結果としてマッピングを行った（図3-3-5）。評価を行ったグリッドの環境特性を視覚的に確認できるよう閾値情報にもとづいて平均底面流速、平均底質、平均水深、最大傾斜度および平均傾斜度に関する環境マップを作成した[図3-3-6-(1)～(5)]。

表3-3-1. ナガコンブ胞子体の生育環境条件および生育評価基準値に基づく判別区分・条件

	底面流速(cm/s)	底質(1,2,3)	最大傾斜度(°)	傾斜度(°)	水深(m)
ナガコンブ生育可能条件					
条件1	30.0-85.0	2.00-3.00	0-40.0	0-4.0	0-8.0
ナガコンブ高生育条件					
条件1	66.6以上	-	11.6以上	-	-
条件2	66.6以上	-	6.0未満	-	-
条件3	56.8未満	2.97以上3.00未満	-	-	-
ナガコンブ低生育条件					
条件1	66.6未満	2.97未満	-	-	-
条件2	56.8以上66.6未満	2.97以上	-	-	-
条件3	66.6以上	-	6.0以上11.6未満	-	-
ナガコンブ中立生育条件					
条件1	56.8未満	3.00	-	-	-

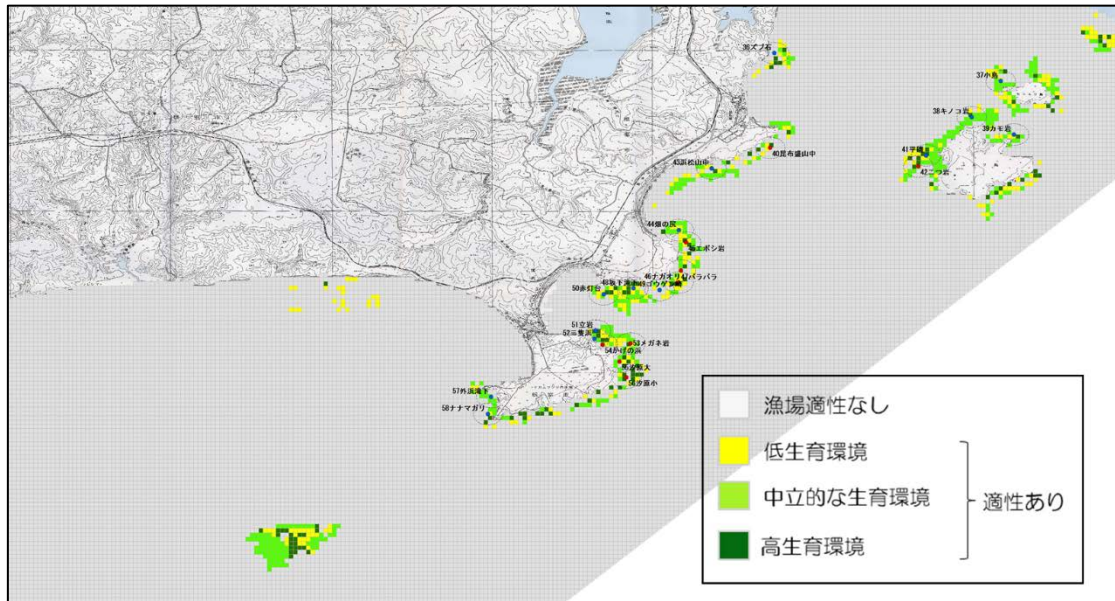


図 3-3-5. 落石海域におけるナガコンブ孢子体の生育ポテンシャルマップ。
 色分けはナガコンブの生育環境条件ならびに生育評価基準値にもとづいて行った。
 灰色：ナガコンブ漁場として適性がない場所、黄色：低生育が予想される場所、
 黄緑：低生育とも高生育ともなりうる中立的な場所、深緑：高生育が期待される場所

落石地区におけるナガコンブ孢子体の生育ポテンシャルの検討

落石海域の計 29,838 の 100 m グリッドのうち、29,099 のグリッドがコンブの生育条件を満たしていなかった(図 3-3-5)。海域のほとんどがナガコンブの生育には不向きな環境であることが分かる。ナガコンブの生育には不向きと判定されたグリッドの多くは2つもしくは3つの要因が同時に関わっており、主に底面流速の遅さ、底質の細かさ、そして水深の深さに起因している(図 3-3-6(1), (2), (3))。

落石海域内でコンブ生育が可能と判断されたグリッドを環境条件別に集計すると高生育の期待される場所は限られており、条件次第で高生育・低生育どちらにもなり得る中立的な生育環境の場所が最も多いことがわかる。このような場所は、海洋環境によりコンブ生育が大きく変動する可能性が高い。高生育漁場(C1)と低生育漁場(C2)ではグリッドの構成は有意に異なり(カイ $X^2=8.1$, $P<0.05$)、C1 は C2 よりも高生育グリッドの割合が高く、中立生育グリッドの割合が低かった。C1 においては、高生育グリッド部分を安定的に維持することがコンブ生産の最大化・安定化に資する。一方、C2 については高生育グリッド部分の維持とともに、環境変動の影響を受けやすい中立生育グリッド部分の適正な管理・活用が漁場全体のナガコンブの生育・生産を底上げする上で重要になる。特に、C2 の中でも高生育グリッドを多く含む漁場は、漁場管理や環境整備によるコンブ生育の向上が期待される場所となる。

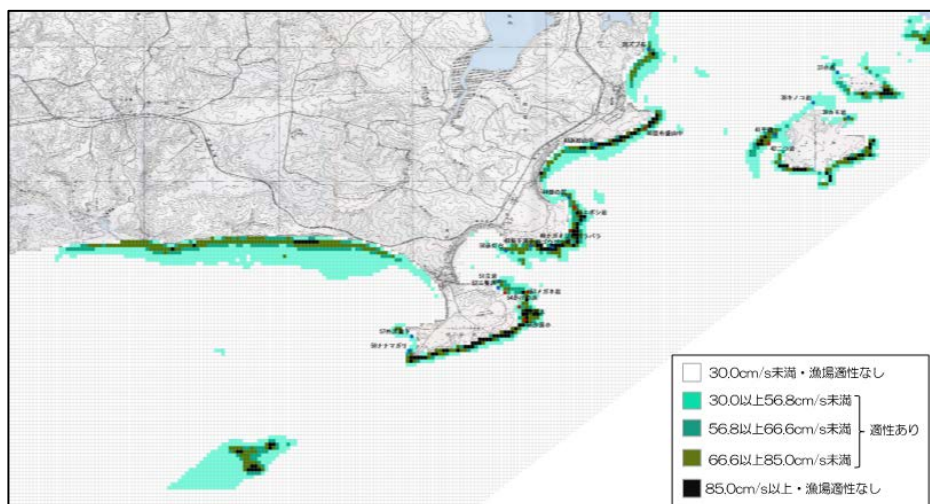


図 3-3-6-(1). 落石海域の流速適性分布図。

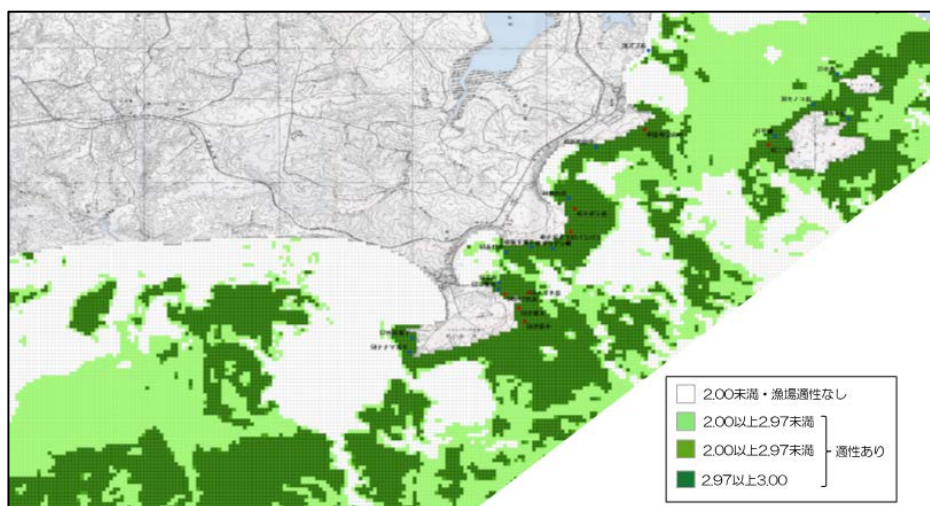


図 3-3-6-(2). 落石海域の底質適性分布図。



図 3-3-6-(3). 落石海域の水深適正分布図。

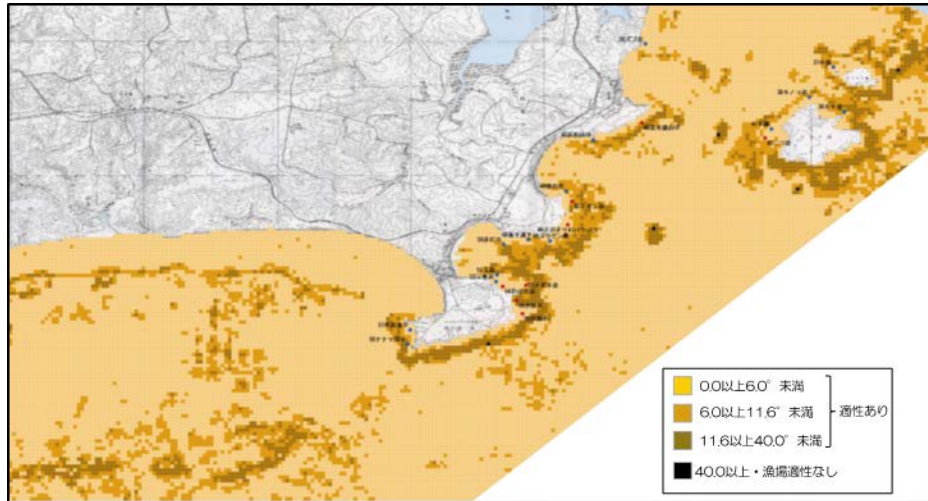


図 3-3-6-(4). 落石海域の最大傾斜度適性分布図。

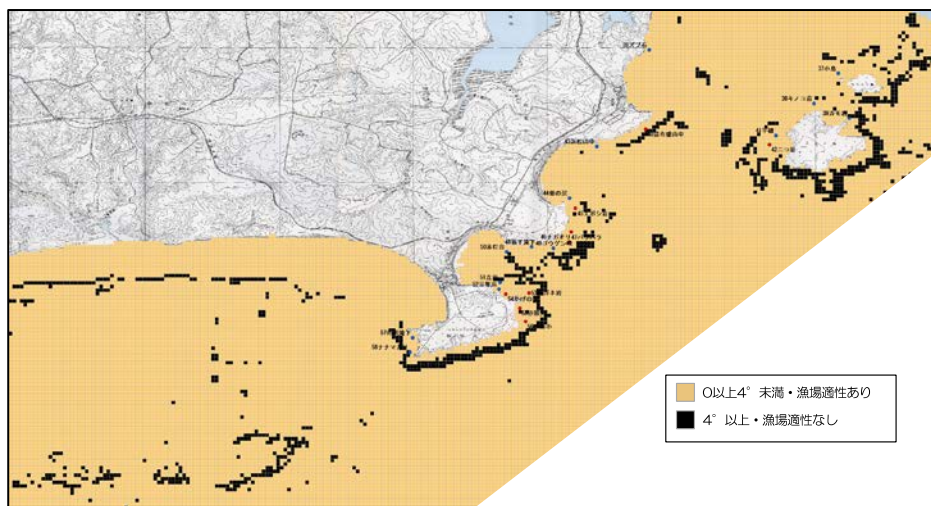


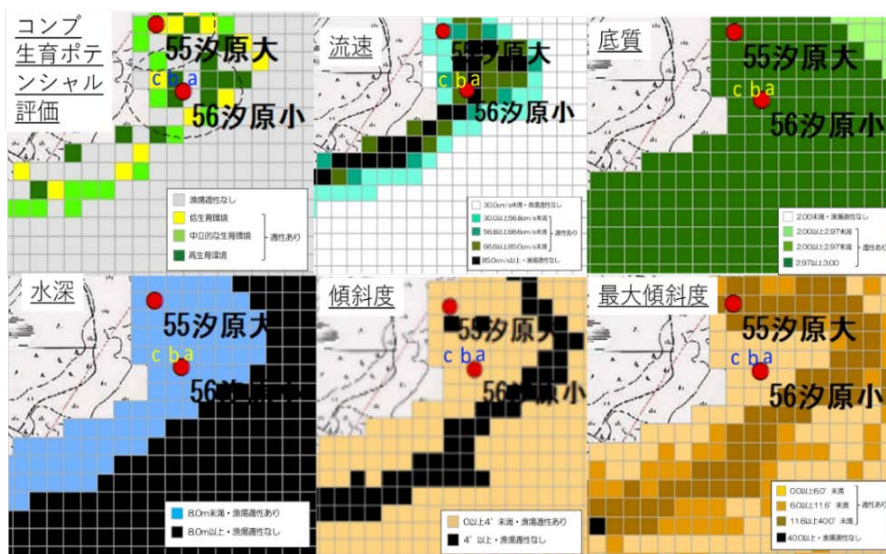
図 3-3-6-(5). 落石海域の傾斜度適性分布図。

生育適地選定・評価を行う上での注意点

コンブの生育期間は生育段階により異なり、遊走子の着生から配偶体の成熟・受精までは数週間程度、幼孢子体の期間は数ヶ月程度、孢子体の期間は1~2年程度である。また、コンブはサイズが大きくなるほど生育に必要とされる環境条件(光、栄養塩など)もより厳しいものとなる。したがって、コンブの適地選定、漁場のポテンシャル評価を行う際には、はじめに生育期間が長く大型の孢子体について適地選定を行い、その後順に前の生育段階について生育条件を満たしているか否かを確認するという手順を進めるのが望ましい。どこかの生育段階で不適と判定された場所については、環境マップを参照することでコンブの生育制限要因を確認した上で、改善策を検討することになる(コラム5)。

(コラム5) 生育ポテンシャルマップの具体的な活用例

コンブ孢子体の生育ポテンシャルマップ例を下図に示した。図中のグリッドa、b、cはそれぞれ生育不可、高生育環境、低生育環境と判定されている。環境マップ(「流速」「底質」「水深」「傾斜度」「最大傾斜度」)を参照すると、底質、水深、傾斜度、最大傾斜度には3地点で違いはなく、流速のみ異なっていることがわかる。グリッドaは、流速が大きすぎるために孢子体の生育において不適、グリッドb、cについては、流速が適正範囲内にあるため生育可能と判定されている。また、流速の大小によりグリッドbが高生育環境、グリッドcが低生育環境と判定されたと読み取れる。このように生育ポテンシャルマップと各種環境マップを組み合わせることで、各グリッド・漁場におけるコンブの生育ポテンシャルの評価や漁場造成、環境整備に向けた生育適地選定が可能となる。



コンブ孢子体の生育ポテンシャルマップおよび各種環境マップの見方。
aは生育不可(流速が高すぎる)、bは高生育環境、cは低生育環境

参考文献

秋野秀樹 (2014) ; 道産コンブの生産安定化に関する研究. 道総研中央水産試験場平成
25 年度事業報告書. pp. 114-115.