

転石帯を含む岩礁域での波浪・水温の経年変化に伴う海藻分布変動

山下俊彦*・高橋和寛**・赤池章一***・桑原久実****

1. はじめに

北海道南西日本海沿岸では、無節サンゴモが優占するサンゴモ平原が拡大し、ホソメコンブなどの大型海藻類が見られない、いわゆる「磯焼け」現象が大きな問題となっている。

磯焼け現象に関しては多くの研究がなされ、その持続要因としてウニの摂餌圧（ウニが海藻を食べる強さ）と海藻着底基質の更新性が重要であることが指摘されている。例えば、北海道（1994）は、磯焼け海域においてキタムラサキウニの除去試験を行い、定期的にウニ除去を実施した海域では、海藻群落が回復することを実証している。また、例年と比較して冬期が低水温、高波浪の年にはコンブ等の大型海藻がよく繁茂することが知られている（例えば、赤池ら（2000））。川俣（1994）、Kawamata（1997）は、水温が低い程、波浪流速が大きい程、ウニ摂餌圧が低下することを定式化している。冬期の低水温、高波浪によるウニの摂餌圧低下が大型海藻繁茂の重要な要因と考えられる。

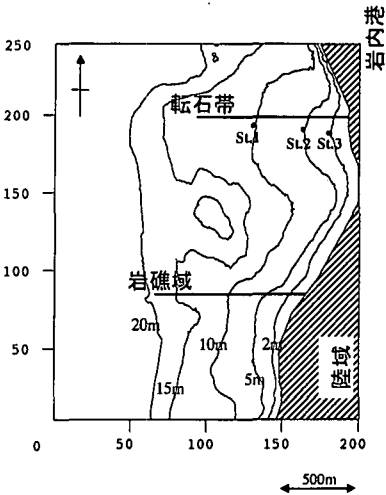
一方、著者ら（1998、2000(a)、2000(b)）は、北海道日本海沿岸の磯焼け地帯でも周辺に砂礫がある海域で海藻群落が形成されている場合があることを報告している。この砂礫はウニの移動・摂餌制限と漂砂摩耗による着底基質の更新等への効果が考えられる（山下ら、1999）。また、著者ら（1997）は、磯焼け地帯の中で岩内港南西側の転石帯に毎年大規模なコンブ群落が形成されることに注目し、この要因について、ウニの摂餌圧及び転石の安定性から検討している。しかし、波浪・水温変化による海藻分布の変動や、漂砂・転石の移動による海藻着底基質の更新・ウニの摂餌抑制の海藻分布への効果は定量的にはまだ把握されていない。

そこで、本研究では、転石帯を含む岩内港南西側海域を対象として、各年の波浪、水温データからウニの摂餌圧を求め、既存の海藻の平面分布と比較検討することにより、海藻分布の経年変化への波浪・水温の影響を明らかにする。

次に、転石帯での現地調査を実施し、シールズ数等の物理環境条件を考慮して、転石の安定性とホソメコンブの現在量、サンゴモの占有率の関係を明らかにする。

2. 現地調査の概要

北海道原子力環境センターでは、1986～1998 年まで、



図一 調査海域

表一 沖波条件と水温

		1月	2月	3月	4月	5月	6月
89 年	波向き(°)	295	295	295	280	260	285
	波高(m)	1.56	1.42	1.06	0.92	0.73	0.58
	周期(s)	6.2	5.8	5.7	5.5	5.2	5.0
	水温(°C)	5.8	5.1	6.5	8.6	10.7	14.1
90 年	波向き(°)	310	295	285	260	275	285
	波高(m)	1.86	1.14	1.05	1.08	0.80	0.54
	周期(s)	6.3	5.5	5.4	5.4	5.2	5.0
	水温(°C)	6.2	6.9	7.3	9.5	12.1	16.4
92 年	波向き(°)	300	290	300	285	290	270
	波高(m)	1.60	1.81	1.08	0.98	0.70	0.39
	周期(s)	6.1	6.3	5.4	5.6	5.1	4.5
	水温(°C)	6.5	5.1	6.0	8.6	11.1	15.2
96 年	波向き(°)	300	290	295	285	295	280
	波高(m)	2.55	1.93	1.74	1.29	0.87	0.46
	周期(s)	7.0	6.4	6.1	5.8	5.2	5.0
	水温(°C)	5.0	3.9	6.2	8.1	11.0	15.9

* 正会員 工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科
** 正会員 工修 戸田建設(株)
*** 北海道立稚内水産試験場
**** 正会員 農博 水産総合研究センター水産工学研究所

積丹半島西岸の神恵内村から岩内町に至る沿岸域で磯焼け現象解明のため、航空写真撮影と代表地点の潜水調査により、6月（大型海藻の極大期）の底生大型海藻類の植生分布図を作成している（赤池，2000）。本研究では、図-1に示す毎年コンブ群落が形成されている転石帯を含む、岩内港周辺海域を調査海域とした。転石帯は、岩内港南西側の等深線が海に向かって凸になっている領域である。この調査海域の航空写真撮影は、1989、90、92、96年に実施されており、赤池（2000）の結果を取りまとめたものを図-2(a)～(d)に示す。調査海域中には、浅い水深帯まで砂の入り込んだ所も存在し、年によってその領域が少し変動していることもわかる。

沖波条件としては、調査海域より約70 km 南西にある瀬棚港で観測された1988から1996年の波浪データを用い、各年の月平均波高、周期、波向きを求めた。水温は、岩内の養殖場での水温を基に各年の月平均水温を求めた。表-1に1989、90、92、96年の1～6月までの月平均の波高、周期、波向き、水温を示す。

転石帯の海藻・底質調査は、図-1に示すSt. 1～3で1998年6月15日に実施した。水深は各々10 m、5 m及び3 mである。調査は、1 m×1 mの方形枠内において、転石別に直径を測定し、付着している海藻を刈り取り現存量を調べた。また、方形枠内の水中写真を撮影し、画像解析によりサンゴモの占有率（面積比）を求めた。このような調査はSt. 1で10地点、St. 2で9地点、St. 3で7地点実施した。

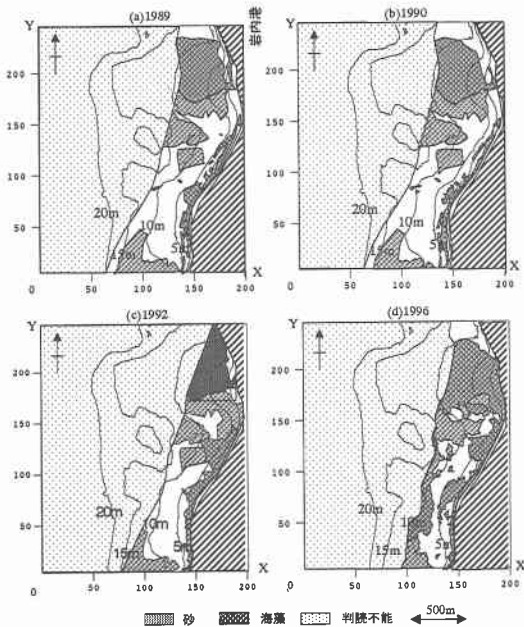


図-2 藻場分布

3. 解析手法の概要

3.1 ウニ摂餌圧

波浪場の解析は、波の屈折・回折・反射・砕波を扱える渡辺・丸山（1984）による非定常緩勾配方程式を用いて、各年各月の平均波に対して行った。計算で得られた波高を、微小振幅波理論により底面流速に変換した。

川俣ら（1994）によると、ウニのコンブ等の海藻摂食作用は、海水の流動の影響を強く受け、次式で評価できる。

$$\frac{F}{F_s} = 1 - \exp \left[-\exp \left(-\frac{u_{\max} - 27.1}{4.27} \right) \right] \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 F ：ウニ1個体の日間摂餌量（g/day/個）、 F_s ：静水中におけるウニ1個体の日間摂餌量（g/day/個）、 $u_{\max}$ ：波動流速振幅である。式（1）は図-3の様であり、ウニの摂食は流速が20 cm/sまでは静水中と変わらないが、その値を越えると急激に低下し、40 cm/s以上ではほぼゼロ（摂食活動なし）となることがわかる。流速40 cm/sは開放性の浅海域ではよく発生する流速であり、ウニの摂食が波動流速の影響を強く受けていることがわかる。

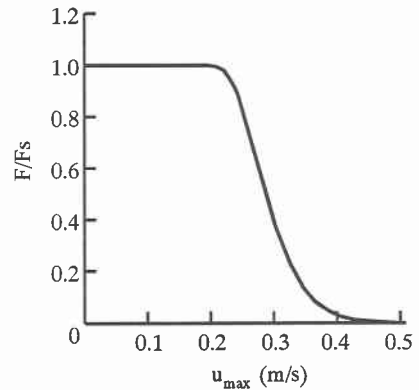


図-3 流速による摂餌量変化

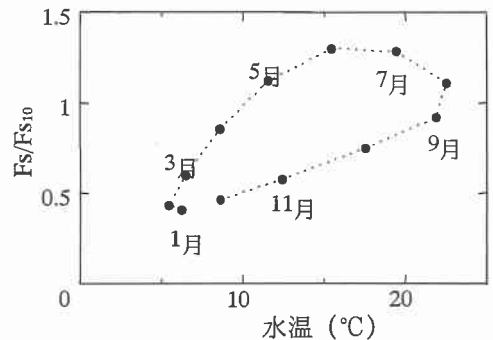


図-4 水温による摂餌量変化

式(1)は水温10°Cで求められたものである。ウニは水温が低下すると活性が低下し、摂餌量が減少し、また、繁殖期である夏季と冬季の季節による成熟サイクルも考慮する必要がある。Kawamata (1997) によると、静水中でこれらの効果は次式で与えられる。

$$F_s = 0.333\theta(1-\theta) \left[1 + 0.344 \sin \left(2\pi \frac{J-48.5}{365} \right) \right] L^{2.1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T : 水温(°C)、 $\theta = 0.653(T - 0.63)/27.36$ 、 J : 1月1日からの経過日数、 L : ウニの殻径(cm)である。 F_s を水温10°C(春期)の場合の F_{s10} で無次元化した F_s/F_{s10} を、一例として10年平均の月平均水温について計算したものが図-4である。この図より、高水温程ウニの摂餌量が多く、産卵が起こる7月以降は同じ水温でも摂餌量が低下することがわかる。

以上より、ウニの摂餌圧 F_e は次式で求める。

$$F_e = F/F_s \cdot F_s/F_{s10} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)より各年の月平均水温を用いて、ウニ摂餌圧を求め、海藻の成長とウニの摂食活動を考慮して、1月~5月まで1日毎に累積摂餌圧を計算し、海藻分布と比較した。

3.2 転石の安定性

転石の安定性は、次式のシールズ数 Ψ で評価した。

$$\Psi = \frac{1}{2} f_w \cdot u_{\max}^2 / (sgd) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 f_w : Jonssonの摩擦係数、 s : 転石の水中比重、 d : 転石の中央粒径である。転石帯にはコンブ群落が形成されているので、1998年6月の海藻分布と比較する代表流速としては、1997年9月~1998年6月の底面流速振幅の上位5%の平均値を用いた。

4. 結果及び考察

4.1 海藻分布

図-2の各年の海藻分布を比較すると、岩内港の南西海域の転石帯では、毎年海藻(コンブ)群落が形成されており、岩礁域に比べて深い水深まで海藻が生息していることがわかる。これ以外の海域では全体的に1996年が海藻分布域が最も大きく、次に89年、92年が大きく、90年が最も小さいことがわかる。 $X=140$ 、 $Y=80$ 付近の等深線が海に突き出した地形のところで深い水深帯まで海藻が繁茂していることがわかる。 $Y=140$ 付近の底質が砂の海域の近くでも深い水深帯まで海藻が生息している年があることがわかる。この領域の砂の分布は砂層厚が薄いためか年により変動している。また、図-2の航空写真による判読では、水深約10m以深では判読不能となっているが、現地潜水調査によると、転石帯では毎年15m程度までコンブが生息していることが報告されて

いる。

4.2 波浪・水温の経年変化と海藻分布

図-5に1989、90、92、96年の月平均波高・水温を示す。コンブ等の大型海藻の幼芽期にあたる1~5月において、96年はどの月も波高が最も高く、水温が低いことがわかる。逆に90年は、水温がどの月も高く、波高がかなり低いことがわかる。89年、90年はその中間の値となっている。図-2の海藻の分布領域と比較すると、波高が高く、水温が低い程、ウニの摂餌活動が抑制され、海藻分布領域が広くなることとよく対応していることがわかる。

図-6に、1989、90、92、96年の各月でウニの累積摂餌圧が1.0以下となる範囲を示す。波高が高く、水温が低い96年は、ウニの累積摂餌圧が1.0以下となりウニの摂餌から守られる領域がどの月も最も大きいことがわかる。一方、波高が低く、水温が高い90年は1~4月までは累積摂餌圧が1.0以下となる領域が最も小さいことがわか

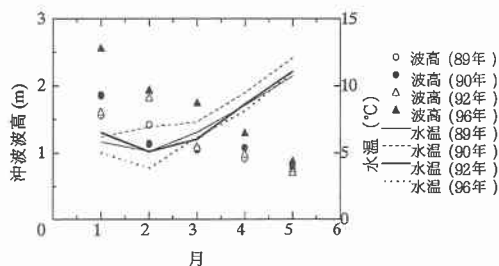


図-5 月平均波高・水温

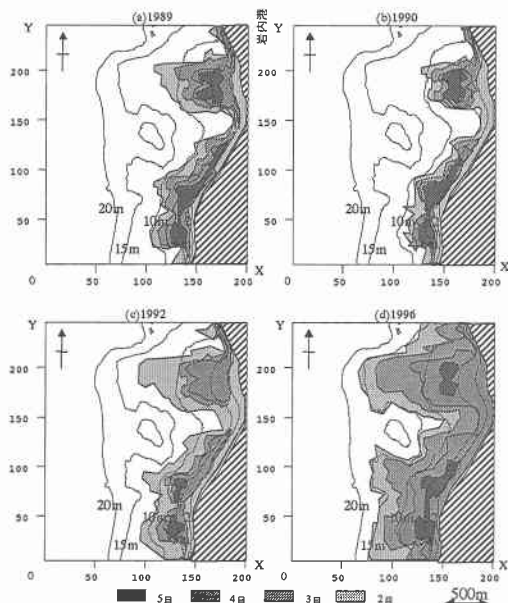


図-6 累積ウニ摂餌圧

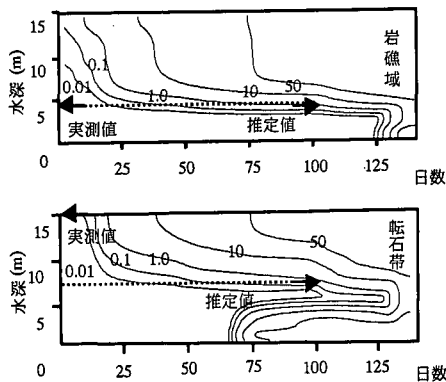


図-7 1990 年における累積ウニ摂餌圧

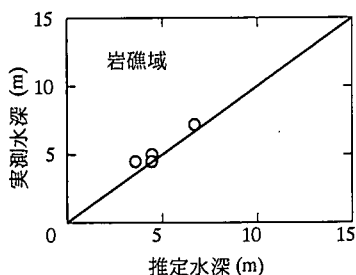


図-8 海藻分布限界水深

る。また、等深線が海に向かって凸型の領域は波当たりが強くなり、摂餌圧が低くなっている。図-2の海藻分布と比較すると、岩内港南西側の転石帯と底質が砂の周辺を除く岩礁域では、4月までのウニ累積摂餌圧が1.0以下となる海域と海藻の分布する海域がほぼ一致していることがわかる。転石帯と砂周辺では、より深い水深帯まで海藻の生息が可能になっている。

底質が砂となる領域は年によって変化するため、砂の領域から離れた図-1に実線で示す転石帯と岩礁域で代表的な側線を取り、その側線上での各水深における累積摂餌圧の日変化を、図-7に一例として90年の結果を示す。図中には、図-2から求めた海藻分布限界水深の実測値と105日(4月15日)で累積摂餌圧が1.0となる海藻分布限界水深の推定値を示す。累積摂餌圧は波動流速の小さい深い方から大きくなり、岩礁域では4月中旬の累積摂餌圧1.0での海藻分布限界水深の推定値と実測値はほぼ一致していることがわかる。転石帯では推定水深より深い水深帯まで海藻の生息が可能であることがわかる。これは、波浪により転石自体が動くために、ウニが不安定な底質を嫌い、個体数が少ないため摂餌されにくいことが、深い水深帯まで海藻の生息を可能にしている重要な要因と考えられる。

図-8に岩礁域での海藻分布限界水深の推定値と実測値の比較を示す。両者はほぼ一致しており、岩礁域では

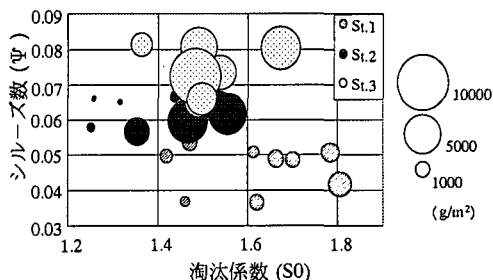


図-9 転石の安定性とホソメコンブ現存量

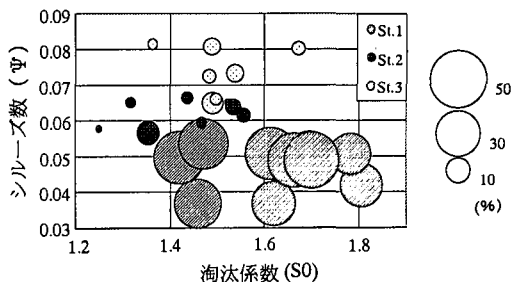


図-10 転石の安定性とサンゴモ占有率

波浪と水温による累積ウニ摂餌圧による変化のみで、海藻分布限界水深の年変化をほぼ推定できることがわかる。

4.3 転石帯の海藻分布

図-9に、転石の安定性とホソメコンブ現存量の関係を1m×1mの方形枠ごとに示す。転石の安定性はシールズ数と淘汰係数で評価した。中央粒径を用いて算出したシールズ数が0.06~0.07、淘汰係数が1.5前後でホソメコンブの現存量が大きくなっている。シールズ数の流速に用いた上位5%の平均値は年に数回の高波浪に対応し、この波による適度な基質更新が行われる所では、1年生有用海藻であるホソメコンブの生息を可能にし、現存量が多くなっていると考えられる。シールズ数の小さいSt.1では、他のSt.2, 3に比べてコンブの現存量が少なくなっている。St.1でのシールズ数はどの方形枠も移動限界シールズ数0.05よりも小さく、転石の移動が少なく、ウニが生息し易く、流速も小さいため、摂餌圧も高いことが重要な要因と考えられる。

図-10に、転石の安定性とサンゴモの占有率(%)を示す。シールズ数の小さいSt.1はSt.2, 3に比較して、サンゴモの占有率が非常に大きいことがわかる。

図-11に転石の直径の頻度分布と各々の直径の転石に海藻があるものとならないものの区別、各々の直径に対するシールズ数をSt.1~3の調査点別に示す。St.3は、St.1, 2と比較して、転石径の小さいものが多いことがわかる。海藻の生息している転石径は、St.1は6cm、St.2は

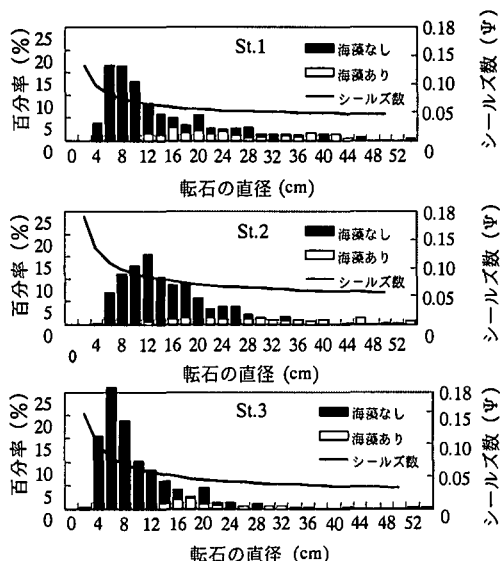


図-11 個々の転石のシールズ数と海藻の有無

12 cm, St. 3 は 12 cm 以上であり, これらの粒径を用いたシールズ数は 0.06 以下に対応している. 個々の粒径を用いたシールズ数が 0.06 以上の転石は, 海藻が着生していないことがわかる. これは, 基質が不安定で, 転石の移動・衝突により海藻が剥ぎ取られるためと考えられる. シールズ数が 0.05 以下の動きにくい転石にも海藻が着生している. これは, 周辺の径の小さい転石が衝突することにより基質更新が行なわれるためと考えられる.

5. おわりに

本研究で得られた主な結果は次のようである.

(1) 岩礁域の海藻分布域 (限界水深) は, 波動流速, 水温, ウニの成熟サイクルを考慮した 4 月中旬までのウニ累積摂餌圧でほぼ推定でき, 1 月から 4 月が高波浪で低水温の年は海藻分布域が広がることを説明可能である.

(2) 転石帯では, d_{50} と上位 5% 流速の平均を用いた

シールズ数が 0.06~0.07, 淘汰係数が 1.5 前後でホソメコンブの現存量が多くなることがわかった. この条件は, 適度に転石が移動することにより, ウニの生存量が少なく, 基質更新が適度に行われることにより, 一年生の有用海藻であるホソメコンブの生息に適しているものと考えられる.

(3) 転石帯では, 岩礁域よりも深い水深帯まで海藻 (コンブ) の生息が可能であり, 今後, 適度な移動を伴う転石帯を造成することにより, コンブ群落の形成も可能と考えられる. その際には上述の条件が指針となると考えられる.

参考文献

- 赤池章一 (2000): 積丹半島西岸域の磯場と磯焼けの現状, 原子力環境センター試験研究, 第 6 号, 119 p.
- 川俣 茂 (1994): 磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性, 水産工学, Vol. 31, 2, pp. 103-110.
- 桑原久実・赤池章一・林 久哲・山下俊彦 (1997): 磯焼け地帯における海藻群落の生育要因に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 1181-1185.
- 桑原久実・川畑勝嗣・山下俊彦 (1998): 航空写真による北海道南西磯焼け海域の海藻分布特性, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 1106-1110.
- 北海道 (1994): 海域特性総合利用技術開発調査報告書 (磯焼けグループ), 68 p.
- 峰 寛明・高橋和寛・山下俊彦 (2000(a)): 北海道の磯焼け地帯におけるホソメコンブ群落の形成条件, 海岸工学論文集, Vol. 47, pp. 1176-1180.
- 山下俊彦・高橋和寛・近藤正隆・峰 寛明・桑原久実・坪田幸雄 (1999): 岩礁性生物ウニ・海藻への漂砂の影響に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 1141-1145.
- 山下俊彦・高橋和寛・田畑真一・斉藤二郎 (2000(b)): 岩礁域と砂浜域中の岩の海藻比較による海藻繁茂への漂砂の影響, 海岸工学論文集, Vol. 47, pp. 1166-1170.
- 渡辺 昇・丸山康樹・清水隆夫・柳山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 海岸工学論文集, Vol. 31, pp. 406-410.
- Kawamata, S (1997): Effect of wave-induced oscillatory flow on grazing by a subtropical sea urchin *Strongylo-centrotus nudus*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 224 (1997), pp. 31-48.