海生研研報, 第9号, 1-46, 2006 Rep. Mar. Ecol. Res. Inst., No. 9, 1-46, 2006

海岸構造物による岩礁域生物の生息場の造成

- 北海道南西部沿岸における海藻と藻食動物の共存をめざして-

道津光生

Construction of the Habitats for the Rocky Benthic Organisms with Using Artificial Coastal Structures^{*1}

- A Case Study at Southwest Coast of Hokkaido -

Kosei Dotsu^{*2}

要約:漁港の防波堤などの沿岸構造物が底生生物の生息場として機能しているという多くの事例が報告されている。本研究は,港湾等の海岸構造物を水産生物の生息場としてより有用に活用することにより,沿岸漁業環境の改善をめざすことを目的として実施されたものである。最初に,発電所の防波堤上におけるキタムラサキウニと海藻の分布と波浪の関係について検討した。その結果,防波堤上にはウニは多数分布するが,餌となる海藻の不足のために,生殖腺の発達が抑制されていることが明らかとなった。つぎに,自然海域のコンブとウニが共存する海域と磯焼け海域に調査地点を設け,両海域の環境条件を比較した。その結果,複雑な海底地形と強い波浪によってウニの摂餌圧が抑制されることにより,海藻の成長がもたらされることが明らかとなった。さらに,電気牧柵によってウニの摂餌圧を人為的に制御することによってコンプ群落の形成を試みた。同時にコンプ群落を形成させるために人工構造物によって制御可能な環境要因について検討を加えた。これらの結果をもとに,コンブ 群落を形成させるための新しいタイプの沿岸構造物を提案した。

第1章 発電所構造物上におけるウニの分布

北海道南西部沿岸に立地された発電所の防波堤におけるウニの分布を調査した。防波堤および近傍 の岩礁域の様々な地点における波浪の影響を評価するために、これらの地点の様々な水深帯に半球型 の石膏をセットし、波による石膏の減少を測定した。同時にそれぞれの地点の垂直面および底面にお ける海藻の被度とウニの密度を測定した。防波堤上にはウニは多数分布するが海藻の被度は極めて低 く、ウニの生殖腺の発達は餌となる海藻の欠乏により抑制されていた。それぞれの地点におけるウニ の密度は波浪環境の季節的な変化に伴い、変動した。波浪が最も厳しく、比較的海藻被度の高い北防 波堤外側では、垂直面の浅場(0~5m)におけるウニの密度は低くなっていた。特に、秋から冬にかけ ての波浪の厳しい季節には北防波堤外側の垂直面全体のウニの密度が極めて低くなった。比較的穏や かな防波堤内側では、年間を通してウニが蝟集しており、海藻は水面際にみられるのみであった。

第2章 北海道南西部磯焼け海域におけるホソメコンブ群落の形成機構

磯焼けが顕著な北海道南西部沿岸の中で,盃海域にホソメコンブ群落が形成される要因を明らかに するための研究を実施した。キタムラサキウニの季節的な分布パターンおよび環境要因を近接する磯 焼け域である泊海域と比較した。水温,塩分,栄養塩類および光条件については両海域間に明らかな 差は認められなかった。しかし,盃海域の波浪は泊海域よりも強く,コンブの新規加入の時期である 秋から冬にかけて厳しくなった。コンブ群落は地形の複雑な盃海域の海底に点在するマウンド上に形 成された。マウンド上のウニの密度はコンブ群落の発達に伴い,春から夏にかけて増加した。コンブ 群落内においては、ウニの密度は波浪の強くなる秋から冬にかけて減少し、冬から春にかけてはマウ ンド上にはほとんどウニは見られなくなった。一方、コンブ群落外のウニの密度は年間を通して高い レベルで推移した。同様に、磯焼け海域である泊海域のウニは高い一定の密度を保った。以上の結果 よりコンブの遊走子の放出される時期にマウンド上のウニの密度が低い状態となり、幼胞子体に対す る摂餌圧が減少することによって、盃海域のコンブ群落の形成が保証されると結論できる。

(2005年8月24日受付, 2005年11月7日受理)

^{*1} 本報告は三重大学大学院平成16年度博士論文を基に再度とりまとめを行ったものである。

^{*2} 財団法人 海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜 4-7-17)

[§] E-mail : dotsu@kaiseiken.or.jp

第3章 電極を用いたウニ排除によるコンブの造成実験

現地実験:電気牧柵を用いてウニの密度を制御することにより人為的にコンブ群落の形成を試みた。 実験区を磯焼け域である泊海域の小湾内の水深4mに設置した。チタン製の電極を縁にそって備えた5× 5×0.3mの四角いコンクリート板よりなる実験藻礁を作成した。電極は5Vの直流電源装置に接続され、 電極の表面には電気分解により薄い酸性の被膜が形成された。ウニはこの酸性の被膜を忌避し、施設 内部への侵入が阻止される。対照区として電極のない、同様の施設を隣に設置した。施設の内側から 外側へのウニの移動は容易に起こるが逆方向の移動は起こらなかった。対照区のコンブはウニの侵入 により完全に消滅した。一方、実験区の内部にはコンブ等の海藻類が繁茂し、コンブの子嚢班の形成 がみられた。最終的には、対照区はほとんど磯焼け状態となり、多くのウニが存在する状態となった。 一方、実験区では、コンブを含む海藻類が高密度で繁茂した。以上の結果より、通常はコンブが繁茂 できない場所においても、捕食者としてのウニの密度を制御することにより、コンブ群落を形成する ことができることが示された。

室内実験:現地実験より,施設の内側から外側への移動は起こるが逆方向の移動は起こらないことが示された。その結果,人工藻礁の内側にウニの存在しない状態を作り出すことによって,コンブ群落を形成することができた。次に,実験室内に電気牧柵を備えた人工藻礁の模型を作り,ウニの行動を観察した。電極で囲まれた施設内へのウニの侵入に対する防御のメカニズムおよび施設内から周囲への逃避の様子について検討した。非通電時における侵入実験では,水槽の底面に配置したウニはわずかの時間にフェンスを乗り越え,施設内へ侵入した。しかしながら,通電時の同様の実験では,ウニの侵入は2週間の実験期間中完全に阻止することができた。逃亡実験では,通電したにもかかわらず,ウニは施設内からより低い底面へ逃亡を試みた。そして,約40秒で施設の縁へ到達し,フェンスを忌避することなく,底面への移動を試みた。しかし,ウニはフェンスへ付着することができず,自重で底面へ落下した。放流から底面への落下までの平均所用時間は98秒であった。これらの結果より電極を装備した人工藻礁における,内側から外側への1方向のみの移動を実証することができた。

第4章 ウニとコンブの棲み分けを考慮した海岸構造物の提案

これらの結果をもとに沿岸構造物をウニの好適な生息場とする方法を検討した。岩礁底における海 藻と藻食動物に影響を及ぼすいくつかの環境要因を抽出し、構造物の工夫によって制御可能な要因を 選定した。海藻と動物は互いに影響を及ぼしあい、底生生物群集の状態は、物理的、化学的要因が海 藻と動物のどちらにより有利に働くかによって決定される。磯焼けの場合、環境条件は動物の方へよ り好適に働いている状態といえる。このような場合、ウニなどの動物の過度な摂餌圧を防ぐために、 海藻の生息場を動物から隔離する必要がある。沿岸構造物の工夫によって制御可能な物理・化学的要 因としては、光、波、基質が考えられる。一方、塩分、栄養および濁りの制御はかなり困難である。 著者はこれらの結果をもとに、ウニが海藻と共存するための沿岸構造物のデザインを提案した。

潜堤付き防波堤:著者は潜堤付き防波堤をコンブとウニの生息場としてアレンジしたものを提案した。 この防波堤システムは通常の消波ブロック被覆堤の消波ブロックを沖側に移動し潜堤とし,防波堤に かかる波の力を少なくするとともに,防波堤と潜堤の間の空間を生物の生息の場として利用するもの である。しかし,この空間よりも潜堤の上部の方が,海藻の成長にはより適していることは明らかで ある。潜堤の上部には浅く,水平な空間が形成される。そして,光条件や付着面の増加により海藻の 繁茂が期待できる。波浪条件は水深が浅くなることによってより厳しくなる。そして,潜堤上に形成 された海藻群落は厳しい波浪によって,ウニの食害より保護される。基質から遊離した海藻は流れ藻 となる。これらの海藻は防波堤と潜堤の間の静穏な空間に集積し,ウニの餌となる。この静穏域はウ ニの生息場となるであろう。この空間は水深が深く,暗く,静穏であることから,磯焼けとなると考 えられるが,磯焼け域はウニの幼生の着底場としては決して悪い場所ではなく,むしろ,無節サンゴ 藻類は幼生の着底と変態を促すことが知られている。

プラットフォーム:本施設は防波堤の上部の一部を削りとり,その部分を沖合に移動することにより,水深1~2mの水平面を創るというものである。磯焼け海域においても,防波堤の水面際には海藻群落が見られる。この浅い空間を広げることによって,海藻の生産を増大させることが期待できる。

電極を利用した生息場分離型防波堤:電極を用いてウニの生息場をコンブより隔離することによる新 しい防波堤システムを提案する。このシステムは、海藻と動物の2段階の生息場より構成されている。 上段は陽極でかこまれたコンブの生息場として、下段はウニの生息場として利用する。上段において は、陽極によってコンブはウニの侵入より防御されるとともに、水深が浅いことから光および波浪条 件が改善されコンブの成長が促進される。成長したコンブは基質より離れ流れ藻となり、下段に集積 し、ウニの餌となる。さらに、たとえ幼生が着底した場合や事故による電気が一時的に停止し、ウニ が侵入した場合でも、電極にふれるとウニは付着力をなくして下段に落ちてゆくことになる。よって、 上段においては、ほとんどメンテナンスを施すことなく、ウニのいない状態を維持することができる。 この防波堤システムは生物学的視点のみから検討したものであり、対波浪性や経済性の観点からの検 討は行っていない。今後は、工学的、経済学的検討が必要と考えられる。

キーワード:海岸構造物,磯焼け,キタムラサキウニ,ホソメコンブ,電気牧柵

Abstract : Many cases have been reported about that the coastal structure such as breakwaters of the fishery ports work as habitats of benthic marine organisms. I have looked for optimal structures that have function of natural habitats for benthic fishery resources such as sea urchin. At first, distribution patterns of *Strongylocentrotus nudus* (sea urchin) and seaweeds on the breakwaters of a power plant were studied in relation with wave forces. And it was found that sea urchin distributed abundantly on the breakwaters, but their gonads were suppressed by the lack of seaweeds as the prey of them. Then two investigation sites were set up on natural field, one in the community of kelp with sea urchin, and the other on the coralline flat without kelp, and environmental conditions of two sites were compared. And it was found that the grazing pressure of the sea urchin was suppressed by the roughness of the bottom feature and heavy waves whereby allowing the kelp to grow there again. Further, I tried to create the kelp bed artificially using an electric barrier to control grazing of sea urchins. Simultaneously, I examined some environmental factors that could be controlled by artificial structures for creating kelp communities. Based on these results, I propose new types of coastal structure designed to create kelp communities.

1. Distribution Patterns of the Sea Urchin on the Coastal Structures

Distribution patterns of the sea urchin were studied on the breakwaters of a power plant sited at southwest coast of Hokkaido. To estimate the wave effects at different stations set along breakwaters and on rocky beds, hemispherical plaster blocks were set at several depths at each station and the rate of plaster weight loss due to wave action was measured. Density of sea urchin and cover of seaweeds were investigated at the same time on vertical and bottom surfaces of each station. Sea urchin distributed abundantly but covers of the seaweeds were extremely low on the breakwaters, so gonadal development of the sea urchin was suppressed by the lack of seaweeds as the prey of them. Density of sea urchin on each station fluctuated corresponding to seasonal changes of wave condition. On exposed side of the northern breakwater, where the wave condition was the hardest and the cover of seaweeds was relatively high, the sea urchin densities on the upper part of vertical surface (the depth were ranged from 0 to 5 m) were low. They became extremely low on every vertical surface especially in stormy season from fall to winter. On sheltered side of the breakwaters under relatively calm conditions, seaweeds covered only shallow parts where sea urchins swarmed throughout seasons.

2. Mechanism of the Formation of the Kelp Bed on Coralline Flats

Studies were conducted to clarify the factors causing formation of locally formed kelp beds of *Laminaria religiosa* in Sakazuki area on the coralline flats prevailing southwest Hokkaido. Seasonal distribution patterns of the sea urchin, S. nudus and environmental conditions were compared with those in neighboring Tomari area dominated by coralline flats. No detectable differences were observed in temperature, salinity, nutrients and light condition between the two areas. But, wave action in Sakazuki was stronger than in Tomari, and increased from fall to winter, which was the season for kelp recruitment. Kelp developed on mounds dotted on the seabed of rough topography in Sakazuki. The density of the sea urchin on the mounds rose from spring to summer as the kelp beds grew. Within the kelp bed, sea urchin density declined as wave strength increased from fall to winter, and few sea urchins were seen on the mound from winter to spring. By contrast, its density outside the kelp beds remained high throughout the year. Similarly high and stable levels of density were confirmed for the sea urchins distributed over the coralline flats in Tomari. It is concluded that sea urchin density on mounds remains low when zoospores of the kelp are released and thus seasonally reduced grazing pressure by sea urchins on young sporophytes allows kelp beds to persist in Sakazuki area.

3. Culturing Experiment of Kelp with Using Electric Barrier

i. Field Experiment

As the next step, I tried to grow the kelp bed artificially by controlling the sea urchin density. An experiment site was set up at the depth of 4 m in a cove of Tomari, dominated with coralline flat. Experimental artificial reef was composed of a flat square concrete plate $(5m \times 5m \times 0.3 \text{ m})$ with a slip shaped titanium electrode (anode) fixed around the edge. The electrode was connected to the output of 5 V of DC. A thin, acid layer was generated on the surface of this anode by electrolysis. Sea urchin disliked the acid layer and were expected not to cross the electrode. As a control, a similar plate without electrode was placed in the neighborhood. The movement of the sea urchin from inside to outside occurred easily, not in the reverse direction. The kelp in the control plate were completely destroyed owing to the invasion of the sea urchin. On the other hand, in the facility with electrode, seaweeds including the kelp grew so thick, and sorus of the kelp were observed. Finally the control square plate was almost barren and many sea urchins were staying there. While the plate with electrode at a corresponding time, seaweeds including the kelp bed by controlling the sea urchin as grazers even in areas where usually the kelp could not grow.

ii. Laboratory Experiments

From the field experiment, I found that the sea urchin migrated from inside to surrounding areas, but a reverse migration did not occur. Thus, a state without sea urchin appeared inside the artificial reef and

a kelp bed could be established. Then, I made a small experimental reef model equipped with an electric fence and observed the sea urchin's behavior in laboratory. I studied the effectiveness of the defense mechanism against the invasion of the sea urchin to the mound surrounded by the electric fence and the manner of the escape of the sea urchin from the mound. During the invading experiment with nonenergizing condition, sea urchins arranged at the bottom of the aquarium got over the fence and invaded the mound within a few hours. However, in the same experiment with an energizing condition, the sea urchins' invasion was completely prevented for the entire two weeks of the experimental period. In the escape experiments, although a current was supplied, sea urchins tried to escape from the mound surrounded by the fence to the lower bottom. And sea urchins reached the mound edge in an average of forty seconds, trying to move to the bottom without avoiding the fence. But sea urchins were not able to attach themselves to the fence (cathode), and soon fell to the bottom under their own weight. The average time from release to falling down was 98 second. From these results, the artificial reef equipped with electric fence was proven to result in only one-way migration of the sea urchin from inside to surroundings. **4. Coastal Structure Design Based on Sea Urchins Ecology**

I started thinking about methods to employ the coastal structures for more suitable habitats of sea urchin based on these results. I picked up some environmental factors which might affect the seaweeds and herbivorous in rocky shores, and selected controllable factors by contriving the coastal structures. As for biological factors, seaweeds and animals affect each other. And the state of the benthic community is defined by physical and chemical factors that affect more suitably whether seaweeds or animals. In case of coralline flats, the states of environmental conditions shift more suitable for animals. And in this case, it is needed to separate the habitats of seaweeds from animals to prevent from overgrazing by animals such as sea urchin. The next, physical and chemical factors that can be controlled by contriving the coastal structures may be light, wave, and substratum. But, obviously, control of salinity, nutrients, and turbidity are thought to be pretty difficult. I propose two types of coastal structure designs that have functions of sea urchin coexisting with kelp based on these results.

i. Composite Breakwater with a Detached Submerged Mound

I arrange the "Composite breakwater with a detached submerged mound" to the habitat of the kelp and sea urchin. This breakwater system has been originally designed to move the concrete armor blocks of usual composite breakwater offshore and make them into submersed mounds, not only for suppressing wave pressure but also for utilizing the space between breakwater and submerged mound as the nursery ground for fin and shell fishes. But, it may be easily noticed that the top of the submerged mound is more suitable for the growing of the seaweeds than this space. At the top of submerged mound, shallow and level space is formed. And growth of the seaweeds is expected due to improve the light condition and increase of settling space. Wave condition gets harder because that depth of the bottom is reduced. Thus, algal bed formed on the submerged mound is protected from grazing of the sea urchin by the hard wave. Seaweeds isolated from this algal bed may become drifting algae. They are accumulated on calm area formed between breakwater and submerged mound, and become the food of the sea urchin. This calm space will be used for habitats of the sea urchin. This space may shift to coralline flat because of deep, dark, and calm conditions, but it is already known the state of coralline flat never has a bad influence to the settlement of the sea urchins larvae. Conversely, coralline algae induce the larval settlement and metamorphosis of sea urchin. An upper half of breakwater is cut off to make a shallow space (Platform). Even in coralline flat dominated area, seaweeds community grew near the water surface of breakwater. And increased production of seaweeds may be expected with such a reformation for extension of shallow space.

ii. Habitat Separating Breakwater System with Electrodes

I propose a new breakwater system that keeps separation of the habitats of sea urchin from kelp more effectively by using electrode. In the system, consisting of two steps for growing places of seaweeds and animals, the upper step backed by breakwater itself is enclosed by the anode and used for the growth of the kelp and the lower step backed by the upper is used for the rearing place of the sea urchin. On the upper step, the kelp are protected from the invasion of the sea urchin by the anode, and growth of the kelp is prompted due to improved light and wave conditions because of shallow depth there. Besides, the kelp grown up well are torn off the substrate to become drifting algae, and they are accumulated on the lower step, thus contributing to the food of the sea urchin. Moreover, even if the sea urchin would exist on the upper step from the larval settlement or possible invasion at accidental stop of the electricity, they seem to lose the sticking power and fall down to the lower step when they come to touch the electrode. So, the condition of the upper step may be kept free from sea urchin with little maintenance. This breakwater system is examined only from the point of biology, and never tries to study about the tolerance to the wave or cost calculation of the system. As a next step, it will be necessary to have examinations from the points of civil engineering and economy.

Keywords : Coastal structure, Coralline flat, Strongylocentrotus nudus, Laminaria religiosa, Electric barrier

まえがき

水産業においては、200海里体制の定着により、 日本沿岸水域の重要性が増加している。しかし, その水域における漁業資源は減少傾向にある。こ れに対して、現在は、単なる自然の営力に任せた 漁業ではなく、「つくり育てる漁業」 あるいは 「資源管理型漁業」への展開を目的として、沿岸 域における漁業生産力を高め、その効率的利用を 図るための漁場の造成と改良が「沿岸漁場整備開 発事業」を中心に行われている。この事業は、コ ンクリートブロック等の耐久性構造物の設置によ る魚礁漁場の造成、藻場・干潟の造成による増殖 場の造成、消波堤による養殖場の造成、堆積物の 除去や作零よる漁場機能の回復等を主な内容とし て、海域や対象魚種の特性および漁場利用の方向 等を考慮しつつ、総合的かつ計画的に実施されて いる(農林統計協会, 1998)。

他方,自然環境に対する国民意識の変化により, 沿岸域を良好な自然環境として保全する要請も高 まってきている。人々の生活水準を向上させるた めには,生産活動の基盤整備として自然環境の開 発とその利用もまた必然的なものである。人間の このような活動は不可避的に自然の改変を伴うも のである。環境への働きかけは,ただ単に現在あ る自然環境を維持するのではなく,自然の影響を 極力少なくしつつ,より良い環境を創りあげて行 く必要があり,環境の改変を生ずる沿岸域の開発 にあたっては,これまで以上に他の沿岸域利用面 への配慮と環境保全の必要性が高まって行くもの と考えられる。

沿岸漁業をはじめとする地域産業の振興,防災 等の観点から,漁港をはじめとする港湾や護岸等 の沿岸構造物は必要不可欠なものであるが,これ らの沿岸構造物の整備においても,環境への十分 な配慮が必要であるといえる。漁港・港湾・護岸 などの構造物には,各種の有用水産生物が集まり, 漁業に利用されている事例がしばしば報告されて いるが,その実態が明瞭に把握されてこなかった ことから,水産土木研究部会(1976)では,各県 の事例を収集し,今後の増養殖事業の参考に資す ることを目的とし,各県の水産課を窓口として, アンケート形式による全国的な規模での実態調査 を実施し,多数の蝟集効果事例を得ている。 その後,水産庁の管轄において,これからの沿 岸漁業の振興と環境保全への要請に対応して、自 然環境と調和した構造物・工法の採用を総合的に 行い、これらの技術の集積、普及を図ることを目 的として、1994年に、「自然調和型漁港づくり推 進事業」が創設され、1995年には、沿岸整備開発 事業等により培った技術および漁港整備を自然と 調和して実施するための技術の検討、および本格 的な事業実施に向けた技術のとりまとめのために 学識経験者による「自然調和漁港づくり委員会」 が設置された(水産十木建設技術センター,1996)。 その後、この事業ではさまざまな漁港修復・改修 事業の実施区域で、藻場の形成を促進する機能や 海水交換機能を有する防波堤等の整備が行われて きた。2002年(平成14年)4月に施行された漁港 漁場整備法においては,環境との調和への配慮が 基本原則に位置づけられたことから、水産庁では この法律の施行に先立ち、自然調和漁港検討委員 会における検討結果を自然環境と調和した漁港づ くりのマニュアルとしてとりまとめている(水産 庁・水産土木建設技術センター、2002)。

一方,運輸省(現国土交通省)では,港湾の開 発と環境保全を協調させて行くために,平成6年 に環境と共生する港湾(エコポート)の形成を目 標とする「新たな港湾環境政策」を策定し,技術 課題の検討を行っている(運輸省港湾局,1998)。

財団法人 海洋生物環境研究所(海生研)では, 資源エネルギー庁からの委託をうけ,発電所と取 放水海域との適合、調和を図ってゆくことにより 発電所立地にあたっての地域社会の理解を得るこ とを目的とし、沿岸海域に生息する魚介類とその 生息の場の最適条件を明らかにするとともに、こ れと調和した発電所の取放水設備等の構造物の在 り方についての検討のための事業として、1988年 から1993年にかけて「取放水海域環境最適システ ム確立調査」を実施した。資源エネルギー庁は, 電気事業に関して,「今後,電源地域の振興を推 進して行くにあたっては、地域と発電所との共生= (地域共生型発電所)を実現して行くことに重点 をおき、地域産業の振興および生活環境の充実に いままで十分に活用されていなかった発電所の有 する諸資源を積極的に活用して行くとのコンセプ トのもとに各種施策を最大限に活用して行く必要 がある」ことを提唱している(資源エネルギー庁、 1992)。発電所の立地にあたってはこれまでにも 数多くの環境対策がなされてきているが、それら の多くは周辺環境へ与えるマイナスの影響をでき

るだけ軽減して行こうとする考え方に基づくもの であった。しかし、一方では、構造物への海藻類 や藻食動物の分布等プラスの変化も認められる。 そして、このような事実は、発電所の建設により 創出される新たな機能,要素を活用してプラスの 効果を引き出し、好適な環境を創りだすことが可 能であることを示している。このような背景のも と、海生研では、前述の「取放水海域環境最適シ ステム確立調査」の後継課題として、資源エネル ギー庁からの委託により、発電所の立地が漁業等 海域利用にとってプラスの効果を与えることを科 学的立場から実証し,将来の海域環境に調和した 発電所の在り方を提案することにより地域住民の 電源立地に対する理解を深め、電源立地の円滑化 に資することを目的として、1993年から2000年に かけて「海域環境調和発電所実証調査」を実施し た。

以上のように,沿岸海域の開発にあたっては周 辺海域へのマイナス影響を軽減するのみならず, 沿岸海域に対する地域社会の要請に対応して港湾 等の人工構造物の持つ潜在的な機能を活用し,好 適な海域環境を創りだす環境対策を講じて行くこ とがますます重要になると考えられる。本研究は, 資源エネルギー庁から海生研へ委託された「取放 水海域環境最適システム確立調査」および「海域 環境調和発電所実証調査」で得られた成果の一部 をとりまとめたものである。

著者らは、港湾等の海岸構造物を水産生物の増 殖場として積極的に活用するための方法について 検討することを目的として、北海道南西部に立地 された北海道電力泊発電所の防波堤等の海岸構造 物およびその周辺海域において潜水観察を行い, 海岸構造物表面には、ウニ類、アワビ類、ナマコ 類等の様々な水産生物が生息し、特に産業上重要 なウニの一種のキタムラサキウニ Strongvlocentrotus nudusが非常に多く生息していることを明らかに した(道津ら, 1996)。しかし, 当該海域を含む 北海道南西部沿岸はエゾイシゴロモ Lithophvllum vessoence 等の無節サンゴモ類が卓越したサンゴ モ平原 (coralline flats; Ayling, 1981), いわゆ る磯焼け海域となっており、多数分布するキタム ラサキウニの過剰な摂餌圧によって、構造物のみ ならず自然岩礁においても藻場の形成が阻害され ている(藤田, 1989;名畑ら, 1992)。その結果, キタムラサキウニ自身の生殖腺の発達も餌不足に よって低い状態に抑えられている(吾妻ら,1997)。

北海道南西部沿岸の磯焼け状態は極めて古くか ら存在すると考えられていたが、磯焼けが発生し たとされる時期に関する科学的な知見はほとんど 存在しない。三本管(1994)の総説によると、水 産庁では、1951~54年にかけて石灰藻(無節サン ゴモ)が磯焼けの原因であるとの想定のもと、全 国的な調査を実施し, 謄写版印刷の報告書の中で, 「北海道岩内地先では、無節石灰藻に覆われて白 色を呈する岩が多いが、僅かに着生する海藻は岩 肌の上にも石灰藻の上にも殆ど差別なく、着生し ているように見え、海藻の着生の原因が石灰藻の 蔓延によるものとすることが疑わしい印象を与え た。」との記述が残されているとしており、1950 年代には、すでに、磯焼けが深刻な問題となって いたことが伺える。藤田(1987)は、大成町の磯 根漁業従事者からの聞き取り調査を実施した。そ して,その結果を基に,「この沿岸の磯焼けは一 時的に急激に起こった現象ではないが、少なくと も1930年代には発生し、1985年頃から進行が明白 になってきたと考えられる」としている。

磯焼けが進行し,海域において餌となる海藻が 不足すると、ウニの身入り(生殖腺の発達)が悪 くなり,生物学的にも水産的にも海域の生産性は 低いレベルにとどまることになる。このような磯 焼け海域における発電所構造物周辺の環境改善の ためには、一次生産者、つまり餌となる海藻の生 産性の向上をはかり、海藻と藻食動物のバランス を適切な状態に保つことが重要となる。一方、磯 焼けが顕著な北海道南西部沿岸においても、一年 生のコンブであるホソメコンブ Laminaria religiosa の繁茂する場所が一部存在する(藤田, 1989;名畑ら、1992;道津ら、1998)。

本研究においては,ホソメコンブとキタムラサ キウニがバランスよく生息する好適な構造物の実 現のためには,実際の自然海域における詳細な観 察が必要と考え,上記のようにウニとコンブが共 存する場所と磯焼けとなっている場所に調査地点 を設け,両サイトの環境条件および生物の分布実 態の比較を行った。そして,両者が共存する場所 の条件を構造物に適用することによって,海岸構 造物周辺の環境改善をめざすことにした。

第1章では、北海道南西部沿岸に立地された発 電所の海岸構造物上におけるキタムラサキウニお よび海藻植生の分布状況と波浪環境との関係につ いて検討を行い、これらの生物の分布に波浪が影 響をおよぼしていること、また、構造物上にはキ タムラサキウニが多数生息するが,ホソメコンブ 等の大型海藻はほとんど生息していないことを明 らかにした。

第2章では、ホソメコンブとキタムラサキウニ の共存する場所と磯焼けとなっている場所に調査 地点を設け、両サイトの環境条件および生物の分 布実態を比較し、共存海域では波浪と地形の効果 によってホソメコンブの新規加入の時期にキタム ラサキウニの摂餌圧が抑制され、コンブ群落が維 持されていることを明らかにした。そして適切な 時期にキタムラサキウニの摂餌圧を制御すること により、ホソメコンブの繁茂が期待できる可能性 を示した。

第3章では、電極板を用いてキタムラサキウニ の行動、摂餌圧を人為的に制御することによって ホソメコンブ場の造成を行うことを目的とした野 外実験(電気牧柵藻礁実験)を行い、①電極板を 境として施設の内側から外側へのキタムラサキウ ニの移動はみられるが、外側から内側への移動は 起こりにくく、電極板によってキタムラサキウニ の藻礁内への侵入を阻止することが可能であるこ と、②電極板を用いることにより、キタムラサキ ウニの摂餌圧が制限要因となり、通常はホソメコ ンブの繁茂していない磯焼け場において、ホソメ コンブを生育させることが可能であることを示し た。さらに室内実験によってキタムラサキウニの 行動に対する電気牧柵藻礁の特性(ウニは内側か ら外側への一方向へのみ移動が可能であること) を実証した。

第4章では、1~3章における野外観察・実験 および室内実験の結果および既往知見をもとに構 造物の工夫によって制御可能な環境要因と制御方 法を整理するとともに、これらの成果をもとに藻 食動物(キタムラサキウニ)と海藻(ホソメコン ブ)の共存する好適な海岸構造物の提案を行った。

第1章 発電所構造物上におけるウニの分布

近年,防波堤等の海岸構造物が本来の港湾維持 のための役割の他に,岩礁性の有用水産生物の生 息場としての機能を持つことが明らかになってき ており(水産土木研究会,1976;武内ら,1990; 谷野ら,1993)これらの機能を積極的に活用しよ うという試みがなされるようになってきた。一方, ウニ類に及ぼす波浪環境の影響は,放流ウニ種苗 の減耗要因(山崎ら,1993;伊藤ら,1995)やウ ニの海藻に対する摂餌圧の制御による藻場造成 (川俣, 1994;川俣ら, 1994;谷野ら, 1994)等 の観点から,最近ようやく注目されるようになっ てきた。著者らは,防波堤等の海岸構造物および 周辺海域をウニ類やコンブ類等の有用動植物の生 息場として活用することを目的とし,1989年から 1992年まで北海道積丹西岸海域の発電所の海岸構 造物上において水産生物の生息実態を把握するた めの一連の調査を実施してきた。ここではこの調 査の結果の一部を示すとともに,これらの結果を 基に,防波堤およびその周辺域におけるキタムラ サキウニ の分布と波浪の関係について検討した。

1. 方法

1)調査海域

調査を実施した北海道電力泊発電所(北緯43°02',東経140°31')は北海道の積丹半島西部の付け根に位置し,南北の大きな防波堤に囲まれ,発電所構内の中央部に取水口が,北防波堤の付け根に放水口が設けられている。発電所の西側は日本海に面し,北西から西の季節風が卓越する秋から冬にかけて海域は時化が続く傾向にある(Fig.1)。調査は,この発電所の北防波堤外側(NE),同内側(NS),南防波堤外側(SE),同内側(SS)の4地点および発電所南北の岩礁域(NR),(SR)で実施した。



Fig. 1 Map showing a power plant and investigated stations. NR; Northern rocky station, NE; Exposed side of northern breakwater, N; Sheltered side of northern break water, SS; Sheltered side of southern breakwater, SE; Exposed side of southern breakwater, SR; Southern rocky station (Dotsu *et al.*, 1997).

2)調査地点の海底地形

調査を実施した防波堤は、直立堤(Breakwater), 底面の被覆ブロック(Foot protection concrete block)および沖合に続く根固めブロック(Foot protection armor block)より構成されており、平 均水面から被覆ブロックまでの水深は約10m(以 下全ての水深は平均水面を基準として示した)で、 南北、内外の4地点ともほぼ同様な構成となって いた(Fig.2)。北側岩礁域(NR)は、やや緩やか に深くなっており、水深約10mで平坦な転石帯と なっていた。一方、南側の岩礁域(SR)はほぼ 垂直に落ち込み、水深約8mで砂質底となってい た(Fig.3)。

3) 海域の波浪環境の測定

防波堤上に生息するウニ類等の有用生物と波浪 環境との関係を明らかにするために、防波堤およ び周辺の岩礁域において石膏塊の減量を指標とす る調査を実施した。

各調査地点の水深2m, 4m, 6mおよび8mの水 深帯(岩礁域は6mまで)に、半球型の石膏塊 (川井ら, 1982)を数日間,各々2個ずつ設置し (Fig.4),設置期間中の石膏塊の減少量を測定した。



Fig. 2 Schematic diagram of investigated breakwaters (Dotsu *et al.*, 1997).



Fig. 3 Schematic diagram of investigated rocky stations (Dotsu *et al.*, 1997).

石膏塊の製作にあたっては、高級石膏2kgに対 して水道水1.4Lの割合で混合し, 直径約12cm, 高さ約4cmの半球型に成形した。成形後は3日間 自然乾燥させ、その後、半球の平面部に接着剤を 塗布して,幅13cm,長さ18cm,厚さ0.5cmのアク リル板に接着した。アクリル板にはあらかじめ四 隅に穴を開けておき、この穴にゴムバンドを取り つけた。現地では、海域に設置する前にゴムバン ドを外した状態で、水道水に40分間浸漬し、水分 吸収による増重がみられなくなった後に,表面の 水滴を除去し、重量を計測した。海域では、設置 する予定地点の所定の水深帯にコンクリート釘を 打ち込み、アクリル板に取りつけたゴムバンドを 釘にかけて固定した。調査終了後は、ゴムバンド を取り外し、水道水中に40分間浸漬した後、表面 の水滴を除去して,アクリル板とともに重量を計 測した。計測の後,アクリル板から残存石膏を取 り除き、アクリル板のみの重量を計測し、これを 差し引き,設置前後の石膏塊の重量を求めた。こ れらの重量の計測に際しては、接着剤の重量は無 視した。石膏減少率は以下のようにして求め、2 個の石膏塊の平均値として取り扱った。

石膏減少率(%/日)= <u>設置前の重量(g)</u>ー回収時の重量(g) 設置前の重量(g)×設置日数(日) ×100

また,石膏の設置に併せて,南防波堤外側 (SE)壁面の水深2m層に電磁流速計(アレック電 子製,ACM-16M型)を設置し,石膏設置期間の 波浪に伴う流速の測定を実施した。測定間隔は1 時間毎とし,1回の測定は300スキャン,スキャ ン間隔は0.5秒毎とした。波浪環境の測定は,秋, 冬,春,夏の生物分布調査と同時に実施した (Table 1)。



Fig. 4 Schematic diagram of hemispherical plaster block for measurement of wave forces (Dotsu *et al.*, 1997).

4) 生物分布状況の把握

波浪環境の異なる発電所防波堤の内外および近 傍の岩礁域の各調査地点において、キタムラサキ ウニの分布調査を実施した。防波堤域の調査地点 では水面から垂直部の底面までは水深1mごとの 矩形区(縦1m,横2m)内に出現したキタムラサ キウニを計数した。垂直面の底部から根固めブロッ ク,被覆ブロックにかけての水平部では、垂直部 との交点から沖合10mまで、2mごとの矩形区 (縦2m,横2m)内における出現個体数を計測し た。岩礁域の調査地点では、防波堤垂直部と同じ く、水深1mごとに矩形区(縦1m,横2m)内のキ タムラサキウニの出現個体数を計数した。また、 これら各調査地点において、水深方向に1m×1m の方形枠を連続的に配置し、枠内に生息する海藻 類の被度を調べた。

5) キタムラサキウニの生殖腺指数の測定

秋,冬,春,夏の生物分布調査時に防波堤域の 任意の場所においてそれぞれ30個体のキタムラサ キウニを採取し,以下のとおり,生殖腺指数を測 定した(簡易的に湿重量比で算定)。

```
生殖腺指数(GSI)= 生殖腺重量(湿重量)
全重量(湿重量) ×100
```

2. 結果

1)海域の波浪環境

各地点の水深2m層における1日あたりの石膏減

少率(波浪環境)は、季節により異なっており、 秋季が最も高く、次に冬季となっていた(Fig.5a)。 一方、地点間の波浪環境を比較すると北防波堤の 外側(NE)の石膏減少率が最も高く、これに対 して、南防波堤外側(SE)ではNEのほぼ7割、岩 礁域(NR、SR)では6割、南北防波堤内側(NS、 SS)では2~3割の減少率を示し、この傾向は全 ての季節を通じてほぼ同様であった。

また、全ての季節を平均し、石膏減少率が最も 高い(波浪の最も厳しい)北防波堤外側(NE) の2m層における減少率を1とした場合の各地点, 各水深帯における減少率の相対値は水深が深くな るに従って低下する傾向がみられ(Fig.5b),2m 層に対して8m層では約半分であった。以上のよ うに、石膏の減少率より求められた海域の波浪環 境には、季節、地点の遮蔽度、水深と密接な関係 が認められた(Table 2)。一方,南防波堤外側壁 面の水深2mに設置した流速計によって得られた 波浪の全振幅は、防波堤の壁面に直交する成分 (Y成分) は極めて小さかったが、防波堤に平行 な成分(X,Z成分)は共に大きく、秋季には2m/s を越える流速値が観測された。石膏設置期間にお ける波浪の全振幅の大きさを比較すると、石膏の 減少率と同様に、秋季>冬季>春季>夏季の順で あった。

2) 海藻被度

防波堤上の地点中で海藻の総被度(無節サンゴ モ類を除く全ての海藻の被度の合計)が最も高かっ

Year	Season	Item	Dates
1989	Fall	Measurement of wave forces	Sep.24-27
		Biological surveys	Sep.22,24,27-Oct.3
1989	Winter	Measurement of wave forces	Dec.15-17
		Biological surveys	Dec.6,14-17
1990	Spring	Measurement of wave forces	Apr.20-23
		Biological surveys	Apr.19-22,24
1990	Summer	Measurement of wave forces	July 6-9
		Biological surveys	July 5-7

Table 1 Schedule of investigation (Dotsu et al., 1997)

Table 2 Wave conditions of investigated area (Dotsu et al., 1997)

	Hard				Calm
Seasons	Fall ↔	Winter	\longleftrightarrow	Spring,	Summer
Stations*	NE ↔	SE↔	NR, SR ←	→	NS, SS
Depth	Shallow ←				Deep

* See Fig.1 for abbreviations for stations

たのは、北防波堤外側のNEで、南北の岩礁域の 地点NR、SRと同等以上の海藻の繁茂がみられた。 また、NEでは僅かながらホソメコンブ、ワカメ Undaria pinnatifida、スジメ Costaria costata 等の 大型褐藻も観察された。NEを除く防波堤の地点 NS、SS、SEの海藻被度はきわめて低い値を示し、 上記の大型海藻類は観察されなかった。NSの夏 季の3~4m層の被度がやや高かったが、これは、



Fig. 5 Seasonal variations in the rate of plaster weight loss at 2m depth at each station(a), and relative weight loss of plaster at different depths at each station(b). In the latter figure, each relative value was obtained by dividing the average weight loss for four seasons at each depth at each station by the weight loss at 2m depth at Station"NE"(arranged from Dotsu et al., 1997).

この範囲にウラソゾ Laurenica nipponicaの群落 がみられたためで、それ以外はごく表層にアナア オサ Ulva pertusa、スサビノリ Porphyra yezoensis、 キブリイトグサ Neosiphonia japonica 等がみられ たのみであった。また、全ての地点において、水 深5m以深では無節サンゴモ類を除く海藻はほと んど観察されなかった(Fig.6)。

3) キタムラサキウニの分布

観察結果を基に防波堤を上層(垂直面の0~5m まで),下層(5m~底面まで),および底面(被 覆ブロックから根固めブロックの沖合10mまで)



Fig. 6 Relationships between total percentage coverage of seaweeds and depth of each investigated station (except coralline algae, Dotsu *et al.*, 1997).

の3つの範囲に区分し,また,南北の岩礁域については,0~5m,5m以深に区分してそれぞれの範囲におけるキタムラサキウニの分布密度(個体数/m²)を求めた(Fig.7)。

防波堤域 (NE, SE, NS, SS) には、岩礁域 (NR, SR) より高密度にキタムラサキウニが分布し、 最高で15.7個体/m² (SEの夏季の上層) であった。



Fig. 7 Seasonal changes of densities of the sea urchin, *Strongylocentrotus nudus* in each area of the investigated stations. At breakwater stations, each station was divided into three areas (Dotsu *et al.*, 1997).

防波堤の内側のNSおよびSSでは、キタムラサキ ウニは年間を通して垂直面に分布する傾向がみら れ、底面の密度は、3つの範囲の中で常に最も低 い値(0.8~3.4個体/m²)で推移した。また、秋季 においても、上層の密度は下層の密度を上回って おり、夏季のSSでは15.5個体/m²の分布が認めら れた。NEでは、キタムラサキウニは下層から底 面にかけて分布する傾向がみられ、特に秋から冬 にかけては、垂直面における分布密度はきわめて 少なくなっており、上層では0.3個体/m²以下となっ ていた。SEにおけるキタムラサキウニの分布状 態はNEとNSおよびSSの中間的な様相を示し、秋、 冬季には垂直面の下層に高密度で分布し、春、夏 季には上層へ分布の中心が移動した。

対照として選定した南北の岩礁域(NR, SR) におけるキタムラサキウニの密度は、年間を通じ て防波堤地点に比べて低い傾向にあり、NRでは、 北防波堤外側のNEと同様に年間を通じて5m以深 に多い傾向を示した。一方、南側岩礁域(SR) におけるキタムラサキウニの密度は最大1.3個体/ m²と低い値を示した。

4) キタムラサキウニの生殖腺指数

生殖腺指数の測定結果を Table 3に示した。今回の測定結果では、かなりの個体間のばらつきが 見られたものの、冬に低く、夏に高い傾向を示し たが、生殖腺の発達が最大となる8月においても 生殖腺指数は7.54と低い値を示した。キタムラサ キウニの生殖腺の発達は生息する場の餌料環境に 大きく影響を受けると考えられ(増殖場造成指針 作成委員会、1982)、当該構造物上にはホソメコ ンブ等の大型海藻はほとんど分布していなかった ことから、構造物上のキタムラサキウニの餌料環 境は必ずしも好適ではないことを示すものと考え られた。

3. 考察

対象海域の発電所防波堤上には、近傍の岩礁域

 Table 3 Gonad index of the sea urchin collected at the breakwaters of Tomari power plant

Season	Date	Test diameter	Gonad somatic index
Fall	Oct.3,1989	53.6±8.5	5.95±4.24
Winter	Dec.7,1989	45.6±11.0	3.88±2.93
Spring	Apr.23,1990	44.1±9.7	5.28±2.69
Summer	Jul.8,1990	44.9±15.7	7.54±2.53

より高密度にキタムラサキウニが生息し,防波堤 がキタムラサキウニの生息場として機能している ことが明らかとなった(Fig.7)。本調査の結果か ら,これらの防波堤上におけるキタムラキウニの 分布について,季節,場所および生息水深帯毎の 相対的な波浪環境の違いによって以下のように説 明することができる。

防波堤は水深10m付近まで垂直面となっている ことから、餌となる海藻は水面際の狭い範囲に分 布が限られている。このため、防波堤上に高密度 で分布しているキタムラサキウニは慢性的な餌不 足の状態にあり、生殖腺の発達も抑制される。波 浪の最も穏やかな防波堤内側(NS, SS)では, 年間を通してキタムラサキウニは垂直面に分布す る傾向があり、特に5m以浅に多かった。これは、 防波堤の水面付近には小型海藻の分布がみられ (Fig.6), 餌となる海藻を求めて水面際へ移動す るためであろう。一方、波浪の最も厳しい北防波 堤の外側 (NE) では、キタムラサキウニは波浪 を避けて5m以深から底面にかけて分布する傾向 があり、特に秋から冬にかけては、垂直面ではき わめて少なくなっていた。これは餌となる海藻が 最も深くまで分布していた(Fig.6)ほか、秋~ 冬季の時化の時期には波浪によりキタムラサキウ ニの浅所への移動が妨げられたり、さらには壁面 から脱落する結果とみられる。また、波浪条件と しては、厳しい環境下にあるNEと静穏なNSおよ びSSの中間的な条件下にあるSEでは、キタムラ サキウニの分布状態についても、両者の中間的な 様相を示していた。

太田ら(1992)は、同発電所のSSおよびSEの 基底部において, キタムラサキウニに標識をつけ て放流し、行動を追跡した結果、防波堤垂直面へ 移動し、さらに水面方向へ移動する傾向を示すこ とを確認している。しかし、この水面へ向かう行 動は、波浪によって阻害される。川俣ら(1994) は、振動流を用いたキタムラサキウニのコンブに 対する摂餌阻害実験によって、移動限界流速が70 cm/s, 摂餌限界流速が40cm/sであることを明らか にした。また、谷野ら(1994)は、海域にビデオ カメラと流速計を設置して観察し、野外における キタムラサキウニの行動に流速が影響をおよぼす ことを指摘している。本調査では南防波堤の水深 2m層の流速は上記の流速をはるかに上回ってい ること、石膏減少率に関する結果から、北防波堤 における波浪に伴う流速はさらに大きな値を示す ものと推測されることから,当海域の防波堤壁面 のキタムラサキウニの分布におよぼす波浪の影響 は,極めて大きいものと考えられる。

以上のように、海域の波浪は、行動の制御要因 として直接的に、また、海藻の分布への影響を通 して間接的にキタムラサキウニの分布に影響を及 ぼし、餌となる海藻を求めて上方へ向かう行動が 波浪によって阻害され、波浪の強さの程度によっ て防波堤上におけるキタムラサキウニの分布帯が 決定されると考えることができる。ウニ類等の水 産生物が多数生息する防波堤等の海岸構造物をこ れらの生物の増殖場としてより有効に活用するた めには、波浪環境や餌環境を考慮した詳細な生態 知見を蓄積する必要があると考えられた。

第2章 北海道南西部磯焼け海域における ホソメコンブ群落の形成機構

第1章では、発電所構造物上におけるキタムラ サキウニの分布および植生と波浪環境との関係に ついての調査結果を示した。そして、発電所構造 物上には、キタムラサキウニは多数生息するが、 ホソメコンブ等の大型海藻はほとんど生息してい ないことが明らかとなった。本章では、ホソメコ ンブとキタムラサキウニがバランスよく生息する 好適な構造物の実現をめざして、実際の自然海域 における詳細な観察が必要であるという考えの基 に、両者の共存する場所と磯焼けとなっている場 所に調査地点を設け、両サイトの環境条件および 生物の分布実態の比較を行った。そして、両者が 共存する場所の条件を構造物に適用することによっ て、海岸構造物周辺の環境改善をめざすことにし た(Fig.8)。

北海道の南西部沿岸はエゾイシゴロモ等の無節 サンゴモが優占し,いわゆる「磯焼け」海域とよ ばれるサンゴモ平原 (coralline flat; Ayling, 1981)が広く分布している。ここでは,水産上重 要なキタムラサキウニが多数生息しており,その 過剰な摂餌圧によって海藻群落の形成が妨害され ていると考えられており(正置・秋岡,1980;藤 田,1989;名畑ら,1992),キタムラサキウニ自 身も餌料不足のため,生殖巣が発達しない状態と なっている(吾妻ら,1997)。しかし,このよう な磯焼けが顕著な海域においても,部分的にホソ メコンブの群落が成立している場が存在すること も知られている(藤田,1989;名畑ら,1992;道 津ら,1998)。高い摂餌圧が存在するサンゴモ平 原になぜホソメコンブ群落が形成されるのかは, 誠に興味深い問題といえる。

吾妻ら(1996)および吾妻・川井(1997)はキ タムラサキウニの季節的な摂餌活動と移動状況を ホソメコンブとの関係で詳細に調査して、水温や 波浪がキタムラサキウニの摂餌活動に影響をおよ ぼすことを明らかにするとともに、キタムラサキ ウニの季節的な深浅移動には生殖巣の発達段階と 相関した摂餌量の変化にもとづく索餌活動が最も 主要な要因となると結論している。著者は、海域 にホソメコンブ群落が成立するか否かはホソメコ ンブの生産とキタムラサキウニの摂餌圧とのバラ ンスにおいて、海域の無機的環境がどちらにより 有利に作用するかによって決定されるのではない かと考えた。そこで、広範囲にホソメコンブ群落 が形成されている古宇郡泊村盃沿岸と近傍の磯焼 け域の環境条件を経時的に比較・観察して、磯焼 け域におけるホソメコンブ群落の形成機構を検討 した。

1. 調査海域および観察地点の選定に関する予備 的検討

磯焼けが進行した北海道の南西部沿岸海域にお いても,部分的にホソメコンブの群落が成立して いる場が存在する。そこで,現地における聞き取



Fig. 8 Flow for realizing the optimal coastal structures that have function of the habitats of benthic marine organisms (Dotsu *et al.*, 2002a).

りを実施し、積丹西岸の盃漁業協同組合管内の前 面海域(盃海域)に、広範囲にホソメコンブ群落 が形成されているという情報を得ることができた。 そこで、この海域におけるホソメコンブ群落の形 成機構を明らかにするために、海域の環境・生物 条件を発電所近傍の磯焼け場(泊海域)と比較し ながらモニタリングを行うこととした。モニタリ ングを開始するにあたり、盃海域におけるホソメ コンブ群落の形成状態を把握するとともに、それ ぞれの海域における生物観察用固定枠(永久方形 枠)の設置地点の選定を行った。

1) 方法

(1) 盃海域におけるホソメコンブ繁茂実態の把 握

盃地先の浅海域(Fig.9)において、1993年8月 23~28日にかけてホソメコンブ群落の有無の確認、 および海底地形の概要の把握を目的としてスノー ケリング潜水による目視観察を行った。

(2) 生物観察用永久方形枠設置地点の選定

上記探索結果をもとに、同年10月2~8日にホソ メコンブ群落中の2地点(盃海域のS-1, S-2)と 磯焼け場2地点(ホソメコンブ群落地点に隣接す る盃海域のS-3および発電所が立地されている泊 海域のT-1)の合計4地点を生物観察候補地点とし て選定し、近傍の水温、塩分の鉛直分布を測定す るとともに、5m×5mの永久方形枠を設置した。

(3) 生物調査

選定された各候補地点において,永久方形枠設 置時に,枠内に出現した動植物の個体数または被 度を測定した。また,各地点の近傍より17~20個 体のウニ類を無作為に採取し,消化管内容物を除 去し,生殖腺とそれ以外の部分に分離した後,そ れぞれを90℃で24時間以上乾燥させ,恒量を確認 の後,以下の式によって生殖腺指数(GSI)を算 定した。

生殖腺指数(GSI)= 生殖腺重量(乾燥重量) ×100

2) 結果

(1) 水温・塩分

水温・塩分の鉛直分布をFig.10に示した。泊海 域のT-1における水温は表層から下層まで一定の 値を示した。盃海域のS-1~S-3では、表層付近で やや変動がみられたが、水深1.5m以深では一定

となり、地点間の差もみられなかった。T-1 にお ける塩分は、水温と同様に表層から下層まで, 33.0~33.2の範囲でほぼ一定であった。S-1~S-3 の塩分は共通に表層で低く、水深1.5m付近に顕 著な躍層がみられ、それ以深では33.9とT-1より も高くなっていた。

(2) 海底地形

8月に実施した潜水観察の結果、 盃海域におい てホソメコンブ群落の存在を確認した。ホソメコ ンブ群落は、(a) 岩盤で周囲よりマウンド状に高 くなった場所, (b) 転石帯, (c) 砂地によって周 囲から隔離された岩にそれぞれ形成されていた (Fig.11)。このうち, (c) については5m×5mの調 査面積を確保できる場所が見つからなかったこと, また、冬季の時化による砂の移動によって場所の 消滅の可能性があることが考えられたため, 候補 地点から除外した。ホソメコンブ群落の地点とし て, (a) のS-1と(b) のS-2を候補地点として選定 し, 磯焼け場にS-3とT-1を選定した。それぞれの 候補地点のモザイク写真をFig.12に、また、地形 概要を以下に示した。



Fig. 9 Location of investigated station of preliminary survey. S-1 and S-2 were located as kelp bed stations, S-3 and T-1 were located as barren stations (Dotsu et al., 1998).

① ホソメコンブ群落地点

S-1:ホソメコンブ群落の代表として盃海域に 設定した地点で、盃漁港南側に位置し、水深は 3.9~5.0mであった。海底は調査枠(5m×5m)よ りもやや大きい1枚岩で、周囲より高くなってい た。

S-2: S-2はS-1と同様にホソメコンブ群落の代 表として選定した地点で、S-1のやや南東の水深5. 5~5.8mの範囲であった。海底は岩盤と転石で構 成されていた。

(2) 磯焼け地点

S-3: 盃海域の磯焼け域として選定した地点で, S-2よりやや沖側に位置し、水深は4.6~5.2mであっ た。海底は岩盤で構成されているが、表面には深 い凹凸や溝、穴等がみられ、大きな岩がいくつも 重なりあった様相を示していた。

T-1:磯焼け域の代表として泊海域に設定した



Fig. 10 Vertical distributions of the temperature and salinity at each station. Measuring date were as follows, S-1 and S-2, Oct.3,1993; S-3, Oct.4, 1993; T-1, Oct.7, 1993 (Dotsu et al., 1998).



(a) : The place swelled up like a mound from the surroundings

(c) : Isolated rock surrounded by sandy bottom

Fig. 11 Schematic diagrams of the different places where kelp beds were formed (arranged from Dotsu et al., 1998).

地点で,調査枠内の水深は4.6~5.2mの範囲であった。底質は岩盤で構成されており,表面には凹凸,斜面,大小の溝や穴が所々にみられた。

(3) 生物相

各地点の生物相の概要をTable 4に整理した。

① ホソメコンブ群落地点

S-1:海藻は12種が確認された。平均被度が最 も高かったのはエゾイシゴロモを主体とした無節 サンゴモで78%, 次がイソガワラ属の一種Ralfsia sp. で14%を示した。本地点では、ホソメコンブ 1,187個体(1m²あたり平均48個体)が確認され、 被度では平均約4%を示した。その他、フシスジモ ク Sargassum confusum, ビリヒバ Corallina pilulifera が比較的多くみられた。動物は24種が確認され, 藻食動物ではコシダカガンガラOmphalius rusticus (181個体), エゾサンショウガイ Homalopoma amussitatum (162個体) が多くみられたが、エゾ サンショウガイの密度は他の地点よりもかなり低 かった。キタムラサキウニは30個体と磯焼け地点 に比較してかなり少ない傾向を示し, エゾバフン ウニ S. intermedius は22個体と4地点の中で最も 多く出現した。また, エゾアワビ Haliotis discus hannai も53個体と最も多く出現した。

S-2:海藻は7種が確認された。平均被度が最 も高かったのはイソガワラ属の一種で、13%を示 した。ホソメコンブはS-1よりも多く 1,808個体 (1m²あたり72個体)が確認され、被度でも6%と 第2位を示した。無節サンゴモの被度は全地点中 で最も低く、5%であった。その他、フシスジモ クが比較的多くみられた。動物は15種が確認され た。優占種はエゾサンショウガイであったが、48 7個体とS-1 に次いで少なかった。その他の藻食 動物としては、コシダカガンガラ(90個体)、エ ゾアワビ(30個体)、エゾバフンウニ(16個体) が多く、磯焼け地点で多くみられたキタムラサキ ウニはわずかに3個体出現したのみであった。

② 磯焼け地点

S-3:海藻は7種が確認された。無節サンゴモが 全域を覆い(被度 100%), その上にイソガワラ 属の一種やイソキリBossiella cretaceaがわずかに 出現した。動物は21種が確認された。優占種はエ ゾサンショウガイ(907個体)で, その他,キタム ラサキウニ,イトマキヒトデAsterina pectinifera,



Fig. 12 Mosaic photographs of the Candidate of monitoring stations at Oct.2-8,1993. T-1:Point at Tomari area, coralline flat, S-1:Point at Sakazuki area, kelp bed, S-2:Point at Sakazuki area, kelp bed, S-3:Point at Sakazuki area, coralline flat (arranged from Dotsu *et al.*, 1998).

Table	4	Comparing	the	fauna	and	flora	in	each	candidate	station	(arranged	from	Dotsu	et	al.,	1998)	
-------	---	-----------	-----	-------	-----	-------	----	------	-----------	---------	-----------	------	-------	----	------	-------	--

		Kelp bed	Corall	ine flat
	S-1	S-2	S-3	T-1
State of the seabed	rock	rock and boulder	rock	rock
Individual numbers of L.religiosa	1187	1808	not observed	not observed
Cover of the crustose coralline algae	78%	5%	100%	93%
Cover of Ralfsia sp.	14%	13%	1%	1%
No.of the algal species*	12	7	7	4
Individual numbers of S. intermedius*	22	16	18	1
Individual numbers of S.nudus*	30	3	175	412
Gonad somatic index of S.intermedius	13.6	17.0	16.2	3.9
Gonad somatic index of S.nudus	7.3	9.6	8.5	2.5
Individual numbers of <i>H.amussitatum</i> *	162	478	907	1201
Individual numbers of H.discus hannai*	53	30	9	4
Numbers of the benthic animal species*	24	15	21	21

* each value shows the numbers in $5m \times 5m$ area

コシダカガンガラが多くみられた。キタムラサキ ウニは175個体と近隣のホソメコンブ群落のS-1, S-2よりもかなり多く出現した。エゾバフンウニ は18個体が観察された。

T-1:出現海藻の4種類のうち、優占種は無節 サンゴモで、平均被度は93%を示した。その他の 出現海藻としては、イソガワラ属の一種、イソキ リがともに1%、キブリイトグサが1%未満で、ホ ソメコンブはみられなかった。動物は21種が確認 された。優占種は藻食性のエゾサンショウガイで、 1,201個体が確認された。また、本地点では、キタ ムラサキウニが412個体と4調査地点中最も多くみ られた。エゾバフンウニは1個体確認されたのみ であった。その他、比較的多くみられたものとし ては、イトマキヒトデ、ユキノカサガイAcmaea pallida、ニシキエビスガイ Tristichotrochus multiliratus、イソギンチャク目が挙げられた。

地点間の生物相の比較

ホソメコンブ群落地点と磯焼け域地点の海藻植 生を比較すると、ホソメコンブ以外の海藻も群落 地点の方が多い傾向にあった。一般に磯焼け海域 の優占種として知られるエゾイシゴロモを主体と した無節サンゴモの被度は、本調査でも磯焼け地 点で多い傾向を示したが、ホソメコンブ群落地点 では、被度の高い場合(78%, S-1)と低い場合 (5%, S-2)があった。一方、無節サンゴモと同 様に岩盤上に密着して生育する褐藻のイソガワラ 属の一種は、ホソメコンブ群落地点で多く(S-1 で14%, S-2で13%)、磯焼け地点では1%(T-1, S-3)と少ない傾向を示した。 藻食動物で最も多くみられたのはエゾサンショ ウガイで、磯焼け地点で多く、群落地点で少ない 傾向を示した。キタムラサキウニは、磯焼け地点 で多かったのに対し(T-1で412個体、S-3で175個 体)、群落地点では少なかった(S-1 で30個体、S-2で3個体)。

エゾバフンウニの分布密度は磯焼け地点と群落 地点の間で違いは明らかでないが、泊海域と比較 して盃海域に多い傾向がみられた。ウニ類と同様 に重要水産生物であるエゾアワビは、磯焼け地点 では少なかったのに対し(T-1で4個体, S-3で9 個体)、群落地点では多数みられ(S-1で53個体, S-2 で30個体)、キタムラサキウニと逆の傾向を 示した。

(4) ウニ類の生殖腺指数

各候補地点近傍で採集したウニ類の生殖腺指数 をTable 5に示した。生殖腺指数の平均値は,エ ゾバフンウニ,キタムラサキウニともにS-2>S-3 >S-1 >T-1 となっており,両種ともに泊海域の T-1の生殖腺指数は盃海域のものよりも明らかに 低い傾向を示した。

Mann-WhiteneyのU検定によって,各調査区間 における生殖腺指数の差に関する有意性の検定を 行った結果(Table 6),両種ともに,泊海域のT-1は全ての地点との間で有意な差が認められた。 一方,盃海域の中では,S-1 とS-2 の間でのみ有 意差が認められた。

3) モニタリング地点の選定

水温・塩分の測定の結果、盃海域では顕著な躍

		S.intermediı	<i>IS</i>		S.nudus	
Station	n	average	SD	n	average	SD
S-1	17	13.55	4.31	20	7.34	3.03
S-2	20	16.98	3.76	20	9.60	1.76
S-3	20	16.19	4.57	20	8.52	1.99
T-1	20	3.90	1.92	20	2.46	1.32

 Table 5 Gonad index of the sea urchins collected at each station (arranged from Dotsu et al., 1998)

Table 6 Test for the significant differences of Gonad index of the sea urchins collected at each station (Mann-Whiteney's U-Test, arranged from Dotsu *et al.*,1998)

		S.inter	medius		S.nudus			
Station	S-1	S-2	S-3	T-1	S-1	S-2	S-3	T-1
S-1	-	s	ns	s	-	s	ns	s
S-2	-	-	ns	s	-	-	ns	s
S-3	-	-	-	S	-	-	-	s
T-1	-	-	-	-	-	-	-	-

s:significant difference was observed, ns:not significant

層がみられた。一方, 泊海域のT-1では水温・塩 分ともに鉛直的にはほぼ一定であったが, 塩分値 は盃海域の下層に比べて低い値を示した。泊海域 の近傍には堀株川, 盃海域の近傍には盃川が存在 することから, 両海域ともにこれらの河川水由来 の淡水の影響を受けているものと考えられた。

潜水による目視観察の結果、盃海域おいてホソ メコンブ群落の形成が確認され,ホソメコンブ群 落は、(a) 岩盤で周囲よりマウンド状に高くなっ た場所, (b) 転石帯, (c) 砂地によって周囲から 隔離された岩に形成されていることが明らかとなっ た。(a) については、周囲より高くなることによっ て、光条件や波浪条件がキタムラサキウニとホソ メコンブとの関係の中でホソメコンブの繁茂にとっ てより好適な条件となったことによって、ホソメ コンブ場が形成されたものと考えることができる。 川嶋・佐々木(1970)は、どのような形の藻礁ブ ロックにおいても、上面のみにコンブが着生する 傾向があり、この原因をブロック表面の微潮流や 光の強さなどが強く影響をあたえるのではないか と推察している。また、Neushul (1972) は、海 底の凹部よりも凸部に、平坦な地形よりも起伏に 富んだ場所にコンブ群落が形成されやすいことを 指摘している。(b) については、波浪による基質 (転石)の反転は、ウニの生息には不適であると ともに、反転の頻度が適切な範囲であれば、無節 サンゴモ等に覆われていない裏面が露出すること になって、ホソメコンブの新規加入に好適に働く ことになると考えられる。また, (c) については, 周囲の砂によって場が隔離され、キタムラサキウ ニの侵入が防止されることによりホソメコンブ群 落の形成が促されたものと考えられる。これらの 場所の生物条件の共通点は、キタムラサキウニの 密度が低い状態で保たれていることが挙げられる。 このことは、キタムラサキウニの摂餌がホソメコ ンブ群落形成に強くかかわっていることを推察さ せる。事実, 磯焼け海域に多数生息するウニを除 去することによって海藻類の繁茂が促進されるこ とは、様々な観察や実験的研究によって実証され てきている (Kitching and Ebling, 1961; Pain and Vadas, 1969 ; Breen and Mann, 1976 ; Pearce and Hines, 1979 ; Bernstein et al., 1981 ; Chapman, 1981 ; Cowen et al., 1982 ; Dean et al., 1984 ; Be nedetti-Cecchi and Cinelli, 1995; 吾妻ら, 1997)。

今回の調査においてホソメコンブ群落の調査候 補地点として選定したS-1は(a) に, S-2は(b) に 相当し、ウニ類の出現個体数は、磯焼け域のT-1, S-3と比較して低い値となっていた。

ウニ類以外の藻食動物では,エゾサンショウガ イの密度が磯焼け地点とホソメコンブ群落地点の 間で大きく異なっていた。本種の大きさを考慮す ると,成長したホソメコンブ胞子体に重大な影響 をおよぼすとは考えにくいが,顕微鏡世代の配偶 体から幼胞子体に対する影響については,浅野ら (1990) がマコンブLaminaria japonica を用いた実 験によってその摂餌圧の重要性を指摘している。

それぞれの候補地点におけるエゾバフンウニと キタムラサキウニの生殖腺指数の比較を行った結 果,盃海域のS-1~S-3から採取した個体の生殖腺 指数は,泊海域のT-1より採取した個体のものよ りも明らかに高く,盃海域内での地点間の差は小 さかった。このことから,生殖腺指数の差は,餌 となるホソメコンブの量に強く影響されると思わ れる。盃海域の磯焼け地点(S-3)の生殖腺指数 が高い理由は,隣接するホソメコンブ群落へのウ ニ自身の移動もしくは,ホソメコンブの寄り藻に より餌料の供給が満たされているためと考えられ る。

今後の調査を進めるにあたり、上記調査結果を 検討するとともに、1996年6月に再度潜水観察し た。その結果,転石のS-2は、冬季の時化によっ て海底地形が大きく変化しており、5m×5mの観 察枠のロープを固定するプレートにも損傷がみら れた。そのため、今後長期間にわたる連続観察に は不適当と考えられた。また、盃海域の磯焼け地 点S-3は、ウニ類の生殖巣重量がホソメコンブ群 落のそれと遜色がなかったことから、ウニ類の身 入りが確保されているこの地点を磯焼け地点の代 表として取り上げるには不適と判断し,除外する こととした。よって、今後はホソメコンブ群落域 の代表地点として盃海域のS-1を,磯焼け域の代 表地点として泊海域のT-1を選定し、それぞれの 環境条件や枠内の群集構造の変化、キタムラサキ ウニとホソメコンブとの関係等について詳細な調 査を継続することとした。

2. モニタリング調査

予備調査の結果をもとに選定した, 盃海域のホ ソメコンブ群落が形成されている水深約4mの岩 盤上(S-1)および磯焼けとなっている泊海域の 同一水深帯の岩盤上(T-1)に5m×5mの永久方形 枠を設定し(Fig.13), 枠内および周辺のキタム ラサキウニとホソメコンブの分布および無機環境 の状況について継続的にモニタリングを実施した。

調査時にはその都度,永久方形枠内をロープで 1m×1mのメッシュ状に区切って観察を行った。

1) 無機環境の比較

(1) 方法

① 海底地形

1994年6月のモニタリングの開始に際して,設定した方形枠の北西-南東方向断面にそって潜水 用デジタル水深計を用いて1m間隔で水深を測定することにより,方形枠近傍の海底地形断面図を 作成した。また,各回の調査ごとにこれらの方形 枠内のメッシュごとに写真撮影を行い,これらを つなぎ合わせたモザイク写真を作成した。

② 水温·塩分

各永久方形枠上において,船上よりポータブル ST計(アレック電子製,ADS-2型)を用いて表層 から海底上 0.5mまでの水温・塩分の鉛直分布を 1994年6月から1996年12月まで毎月1回測定した。



Fig. 13 Map showing the monitoring stations along the coast of Sakazuki and Tomari (arranged from Dotsu *et al.*, 2002a).

③ 栄養塩類

永久方形枠上において,船上よりバンドーン型 採水器を用いて表層,2m層,ならびに海底から 0.5m上層の海水を採取し,海洋観測指針に従っ て,NH₃-N,NO₂-N,NO₃-NならびにPO₄-P量を測 定した。調査期間は水温・塩分と同様である。

④ 光量子量

石川ら(1988)の方法に準じて,LI-COR社製2 π光量子センサーを用いて一定時間内の水深4m 層,および8m層の光量子量(400~700nmの光合 成有効波長: PAR=photosynthetically active radiation)を実測し、減衰係数k,および水面直 下の光量子量Io (mol/m²/h) を求めた。同時に, 両海域の近傍の陸上のほぼ全天が見渡せる場所 (盃海域:盃漁港防波堤, 泊海域:株式会社エコ ニクス泊事業所) に日射計を設置し, 光量子量測 定時間帯の積算日射量(MJ/m²/h)および同日の 日積算日射量を求めた。日射量の測定には英弘産 業製の日射計(光合成有効日射量測定用:395~ 715nm, 出力定数5mV/cal/cm², 1cal=4.19J) を用 いた。そして、Ioと日射量の関係、減衰係数k, ならびに北海道原子力環境センターより入手した 年間の日射量観測データとの関係から対象海域の 各水深帯における年間の日積算光量子量の推定を 行った。

光量の測定を開始した1994年6月には,潜水に よって盃海域におけるホソメコンブの分布の下限 を調査した。なお,光量の観測は1994年6月から 1995年5月までの1年間のみ毎月1回実施した。

⑤ 波浪環境

1994年から1995年にかけて年4回(Table 7), 各回7~15日間,永久方形枠近傍の同一水深帯 (約4m)の永久方形枠設置場所とほぼ同様な地形 の場所に電磁流速計(アレック電子製,ACM-16 型)を設置し,海底から25cm上層の波高および 流速を測定した。さらに,北海道電力株式会社泊

Table 7Schedules for measurement of wave
conditions using electromagnetic flowmeter at
Sakazuki and Tomari (arranged from Dotsu *et al.*, 1999)

Vaara	Sancong	Area					
rears	Seasons	Sakazuki	Tomari				
1994	Fall	Oct.10 - Oct.22	Oct.10 - Oct.22				
1995	Winter	Jan.22 - Feb.4	Jan.21 - Jan.28				
1995	Spring	Apr.14 - Apr.27	Apr.13 - Apr.22				
1995	Summer	July 9 -July 24	July 9 - July 24				



Fig. 14 Mosaic photographs showing the bottom feature and vegetation in permanent quadrates at Sakazuki and Tomari stations. a, Sakazuki (Jun. 1994); b,Sakazuki (Jan.1995); c, Tomari (Jun.1994) (arranged from Dotsu *et al.*, 2002a).

発電所から,同発電所北防波堤西側の水深20mに 設定された波浪観測点(Fig.1)における波高観 測データの提供を受け,電磁流速計によって観測 された波高および流速データとの比較を行った。 そして,上記データの比較結果と泊発電所波浪観 測点における年間の波浪観測データを参照して, 両海域の永久方形枠近傍の年間の波浪に伴う軌道 流速の日平均値の推定を行った。

(2) 結果

① 海底地形

盃海域の1994年7月(ホソメコンブ胞子体が海 底表面を覆った状態),1995年1月(胞子体がほと んど消失し海底が露出した状態)ならびに泊海域



Fig. 15 Bottom topographies in the monitoring sites of Sakazuki and Tomari (Dotsu *et al.*, 2002a).

の1994年7月における5m×5m永久方形枠の写真 をそれぞれFig.14に、また、永久方形枠を中心と した約20mの範囲の周辺域の北西-南東の海底地 形をFig.15に示した。盃の海底地形は起伏に富み、 永久方形枠周辺は3つの丘状部(マウンド)が連 なり、その両側は水深6~7mの谷状部(窪地)と なっていた。泊海域の永久方形枠周辺は北西側に 浅く、南東側に深いなだらかに傾斜する地形となっ ており、南東側水深約7mで転石帯となっていた。

水温・塩分

両海域の海底から0.5m上層における水温,塩 分の季節変化をFig.16に示した。水温は両海域で 等しく推移しており、9月に年間最高、2月~3月 に最低であった。最高水温は1994年には24.5℃、 1995年には22.0℃、1996年には21.5℃と経年的に 低下する傾向がみられた。最低水温は、1995年に は3月に5.3℃、1996年には2月に4.6℃を示した。 表層塩分についてはデータを示さなかったが、そ れぞれの海域でかなりの変動を示した。盃海域で は、盃川が調査区南側に流入しており、1996年4 月には15.0ときわめて低い値を示した。また、泊 海域には発電所の南側に堀株川が存在し、1995年 7月には塩分は22.6まで低下した。しかし、海底 から0.5m上層においては両海域ともに31を下回 ることは無く、周年ほぼ一定していた。

③ 栄養塩類

両海域の海底から0.5m上層におけるDIN(溶存 態無機窒素=NH₃-N +NO₂-N+NO₃-N)の季節変 化をFig.16に示した。両海域のDINは夏には定量 限界値付近で推移し、冬には0.1mg-N/L近くまで 上昇するという周期的な変化を示し、両海域での 差は認められなかった。PO₄-PもDIN とほぼ同様 な変化を示し、両海域での差は認められず、夏に 低く,1996年9,10月に0.002mg-P/L,1997年8,10 月および1998年9,10月には0.002mg-P/L未満とな り、冬に高く1997年2月に0.014mg-P/L,1998年3 月に0.012mg-P/Lとなっていた。

④ 光量子量

水面直下の日積算推定光量子量lo,両海域の4 m層(永久方形枠設置水深),および盃海域の6.2 m層(盃海域においてホソメコンブの生育を確認 した最大水深)における日積算推定光量子量の月 平均値の推移を Fig.17に示した。lo値は1994年6 月に最も高く,31.63mol/m²/dayを示し,その後し だいに減少し,12月に最低の5.33mol/m²/dayとなっ たが,1995年1月以降再び高くなった。また,両 海域の水深4m層における光量子量には大きな差 はみられず,Ioの変化にともない変化した。盃海 域の6.2m層と泊海域の4m層の光量子量を比較す ると,1994年9月および1995年2月のみ僅かに盃海 域の値が高くなったが,全体的には泊海域4m層 の値が高くなっていた。



Fig. 16 Seasonal changes in water temperature (a), salinity (b) and dissolved inorganic nitrogen (c) at 0.5 m above the seabed in the two investigated sites for the period from June 1994 to December 1996 (Dotsu *et al.*, 2002a).

⑤ 波浪環境

泊発電所波浪観測点における有義波高Hと盃, 泊両海域の永久方形枠近傍に設置した流速計より 得られた有義波高(盃:Hs,泊:Ht),さらに,両 海域の有義波高と流動の主成分である東西成分の 流速の全振幅値(盃:Vs,泊:Vt)との間には,以 下のように極めて高い相関がみられた。

 $\begin{aligned} Hs &= 0.679H - 0.040 \ (r^2 = 0.913) \\ Ht &= 0.556H - 0.055 \ (r^2 = 0.920) \\ Vs &= 1.747Hs + 0.057 \ (r^2 = 0.993) \\ Vt &= 1.154Ht + 0.010 \ (r^2 = 0.984) \end{aligned}$

この関係をもとに1994年6月から1996年12月ま での両海域の永久方形枠近傍における波浪にとも なう軌道流速の日平均値(全振幅値/2)の変化を Fig.18に示した。軌道流速から判断した両海域の 波浪の程度は春~夏に弱く秋~冬に強いという結 果となっており、かつ、盃海域の方がより強い波 浪条件下にあることが明らかになった。

2) 盃海域と泊海域におけるキタムラサキウニの 生物特性の比較

(1) 成長

① 方法

1994年6月から1995年5月にかけて、両地先の水 深4mの海底より1ヶ月ごとにそれぞれ50個体のキ タムラサキウニを無作為に採取し、生殖板の輪紋 の測定による年齢査定を行った。さらに、1995年 6月から1996年5月までは、特に若齢期の成長を詳 細に観察するために、1ヶ月ごとに殻径30mm以



Fig. 17 Seasonal changes in estimated underwater irradiance (PAR = photosynthetically active radiation) at depths of 0 m (Io), and 4 m of each station and at 6.2 m in Sakazuki site for the period from June 1994 to May 1995 (Dotsu *et al.*, 2002a).

下の小型のキタムラサキウニを両海域よりそれぞ れ30個体採取し,輪紋の観察を行った (Dotsu *et al.*, 2004)。

輪紋の観察はJensen (1969) および川村 (1973) の方法に準じ,第5生殖板の輪紋数を計数した。 第5生殖板の輪紋が不鮮明な場合は他の生殖板を 同時に観察し輪紋の数を推定した。

2 結果

全観察個体に対する,輪紋形成途中の個体(第 5生殖板の縁辺が黒くなっている個体)および輪 紋形成直後の個体(第5生殖板の最も外側の輪紋 と縁辺との間が極めて狭い個体)の出現率をFig. 19に示した。輪紋形成途中および形成直後の個体 は,10月~11月頃より出現した。無作為に採取し た1995年5月までのサンプルのうち,大型の個体 は外側の輪紋の間隔が狭く,輪紋形成時期の判断 が困難なものがあったが,小型個体のみを観察し た1995年6月以降のサンプルのうち,1996年1月お よび2月の個体は全て輪紋形成途中もしくは形成 直後の個体であった。

4月には輪紋形成途中もしくは直後の個体は認 められなくなった。これらの結果から、当海域に おけるキタムラサキウニの輪紋は冬季(12~2月



Fig. 18 Seasonal changes in water movement induced by wave action (daily averages of significant value of velocities=V1/3) at 0.25 m above the seabed in each site for the period from June 1994 to December 1996. Arrows indicate periods when the electromagnetic flowmeters were used (Dotsu *et al.*, 2002a).

頃)に形成される年輪であることが明らかとなった。また,1995年の7月~12月までのサンプル (小型個体)において,前年生まれと考えられる 輪紋の無い極めて小さい個体が多数観察されてお り(最も小さい個体は,7月に泊海域で採集され, 殻径7mmであった),産卵期を10月頃(Fuji,1960) と仮定すると,第1輪の形成時期は産卵後1年2~4 ヶ月後と推定された。

両地先より採取したキタムラサキウニの年齢と 殻径の関係をFig.20に示した。それぞれの地先の キタムラサキウニの年齢(t)と殻径(Dt)との 関係は以下の式で示された。

```
盃海域:Dt=53.3 (1-e<sup>-0.320(t+0.342)</sup>)
泊海域:Dt=59.9 (1-e<sup>-0.180(t+0.447)</sup>)
```

両海域より得られた1~10歳および11歳以上の それぞれの年齢群について,平均殻径を比較し, Table 8に示した。その結果,1歳~7歳までは,p <0.01,8歳については,p<0.05で有意差が認め られ,盃海域の殻径が泊海域のものより大きかっ た。しかし,9歳以上については,有意差は認め られず,盃地先のキタムラサキウニの成長を泊地 先のものと比較すると,盃地先の方が泊地先のも のに比べて初期の成長が良好であり,それ以降は ほぼ等しくなることが明らかとなった。

(2) 生殖腺指数の変化

① 方法

両海域の永久方形枠近傍より、1994年6月から、 1995年5月にかけて毎月1回採集した殻径40mm以



Fig. 19 Seasonal changes in the appearance rates of *S.nudus* in which new ring were forming and right after formed on the genital plates (Dotsu *et al.*, 2004).

上のキタムラサキウニ30個体について,消化管内 容物を除去し,生殖腺とそれ以外の部分に分離し たのち,それぞれを90℃で24時間以上乾燥させ, 恒量を確認の後,生殖腺指数(GSI)を算定した。 なお,ここでは,北海道南部におけるキタムラサ キウニの初成熟サイズが殻径40~45mmであると いう報告(Fuji,1960)にもとづき,殻径40mm以 上の個体について検討した。



Fig. 20 Relationships between ages and test diameters of *S.nudus* from Sakazuki and Tomari area (Dotsu et al., 2004).

また,これとは別に,1996年7月に泊漁協およ び盃漁協管内の漁業者により漁獲されたキタムラ サキウニを購入し,同様の方法で生殖腺指数を算 定した。

2 結果

両海域より採集したキタムラサキウニの生殖腺 指数の月変化をFig.21に示した。盃海域のキタム ラサキウニの生殖腺指数は、6~8月にかけて増加 し、8月に最大となった。その後、9月になると減 少しはじめ、12~2月に最低となり、3月以降再び 増加する傾向を示した。泊海域のキタムラサキウ ニの生殖腺指数の変動は盃海域とほぼ同様の傾向 を示したが、各月の値は盃海域のものと比較する とつねに低い値で推移した。また、それぞれの調 査海域近傍で1996年7月に漁業者によって漁獲さ れたキタムラサキウニの生殖腺指数の平均値は、 盃海域では19.7、泊海域では14.7であった。

(3) 食性(消化管内容物の強熱減量)

① 方法

両海域の永久方形枠近傍より,1994年6月から 1995年5月にかけて毎月1回の採集したキタムラサ キウニのうち海域ごとにそれぞれ20個体を無作為 に抽出し,消化管内容物を取り出し,日本水産資 源保護協会(1980)の底質の分析方法に準じて, 以下の方法により消化管内容物の強熱減量を測定 した。

乾燥重量:105℃で12時間以上乾燥後の重量 (恒量を確認)

焼却後の重量:上記乾燥サンプルをさらに600

	1		2		3		4		5		6
11	-13	23	-25	35	-37	42	-53	54	-65	66	-77
Т	S	Т	S	Т	S	Т	S	Т	S	Т	S
67	10	29	42	37	74	56	172	78	35	48	22
12.35	18.49	23.20	28.64	25.20	34.48	33.20	38.01	36.55	46.43	40.55	45.84
1.92	2.79	2.82	3.44	2.81	5.34	5.42	5.96	5.08	7.31	5.03	3.82
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
										· •••	
	7		8		9	1	0	1	1-		
78	-89	90-	-101	102	-113	114	-125	126	-206		
Т	S	Т	S	Т	S	Т	S	Т	S		
26	25	32	20	57	34	62	38	69	40		
42.49	46.63	45.82	48.36	49.03	48.18	51.04	51.28	53.63	54.94		
3.07	3.25	4.32	3.20	5.37	4.05	4.75	5.43	5.13	5.81		
*	*		*	I	ns	1	15	r	is		
	11 T 67 12.35 1.92 * 78 T 26 42.49 3.07 *	1 11-13 T S 67 10 12.35 18.49 1.92 2.79 * * 7 78-89 T S 26 25 42.49 46.63 3.07 3.25 * *	1 23 T S T 67 10 29 12.35 18.49 23.20 1.92 2.79 2.82 * * * 7 78-89 90- T S T 26 25 32 42.49 46.63 45.82 3.07 3.25 4.32	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$							

Table 8 Ages and test diameters of Strongylocentrotus nudus collected from Sakazuki and Tomari (Dotsu et al., 2004)

*1:T = Tomari, S = Sakazuki, **p < 0.01, *p < 0.05, ns: no significance (with using *t*-test).

For the one to three years old groups, samples data collected from September to November were used, and for the over four years old groups, to replenish the samples for statistical analysis, data from June to May were used.

℃で2時間以上焼却した後の重量(恒量を確認)

2 結果

両海域のキタムラサキウニの消化管内容物の強 熱減量の月変化をFig.22に示した。強熱減量は消 化管内容物(摂取した餌)に含まれる有機物量の 指標であり,餌料として有効なホソメコンブ等を 多く摂取した場合には高い値を示すことになり, 砂粒や無節サンゴモ類等を多く摂取すると低い値 を示す。盃海域のキタムラサキウニの消化管内容 物の強熱減量は、ホソメコンブが最も繁茂してい た1994年6月に最も高い値を示したが、その後次 第に減少し1995年1月に最低となった。それ以降



Fig. 21 Seasonal changes in gonad index of sea urchin at both sites. Vertical bars show the standard deviation (n = 30)(Nomura *et al.*, 2006).



Fig. 22 Seasonal changes in ignition loss of the gut contents of S.nudus at both sites. Vertical bars show the standard deviation (n = 20) (Dotsu *et al.*, 2004).

は3月まで再び増加したが、4月以降は減少した。 これは、1995年におけるホソメコンブの繁茂量が 前年に比べてかなり少なく、しかも3月以降、摂 餌しやすい幼体の個体数が減少したためと考えら れた。一方、泊海域のキタムラサキウニの強熱減 量は低い値で推移したが、11月から12月にかけて 急激に増加し、12月には盃海域を上回った。1995 年の1月から2月にかけては最も低くなったが、そ れ以降は再び増加し、5月には盃海域とほぼ等し くなった。両海域のキタムラサキウニの消化管内 容物の強熱減量値を比較すると、1994年12月の結 果を除き盃海域の方が常に高い値を示しており、 両海域のキタムラサキウニの餌料環境には明らか な差があると考えられた。

3)キタムラサキウニとホソメコンブの分布状況(1)方法

盃および泊海域の永久方形枠内に出現したキタ ムラサキウニの個体数とホソメコンブの仮根部の 被度を1994年6月から1996年12月まで毎月1回潜水 目視により調査した。これに加えて1995年4月か らは、永久方形枠内と周辺のキタムラサキウニ密 度を比較するため、盃、泊両海域の永久方形枠近 傍のホソメコンブが生育していない場所において、 lm×lmの方形枠を任意に20枠置き、枠内のキタ ムラサキウニの個体数を計数した。

(2) 結果

永久方形枠内外のキタムラサキウニ密度の 季節変化

1994年6月から1996年12月における両海域の永 久方形枠内(25m²)および周辺(20m²)のキタ ムラサキウニの生息密度の季節変化をFig.23に対 数値で示した。1994年6月から1995年3月までの盃 海域の永久方形枠内のキタムラサキウニの密度は 春から夏にかけて10個体/m²程度まで上昇し,秋 から冬にかけて0.04個体/m²まで減少するという 明瞭な季節変化を示した。1995年4月から調査し た永久方形枠周辺でホソメコンブが繁茂しない場 所におけるキタムラサキウニの分布密度をみると, 1996年3月~5月にかけては永久方形枠内から全て のキタムラサキウニが消失したにもかかわらず, 永久方形枠外のキタムラサキウニの密度はほぼ10 個体/m²のレベルで推移した。一方, 泊海域の永 久方形枠内外では、いずれも周年にわたり10個体 /m²のレベルでほぼ一定であった。

② 盃海域におけるホソメコンブ被度の季節変

化

盃海域の永久方形枠内のホソメコンブの被度の 季節変化をキタムラサキウニの生息密度とともに Fig.24に示した。ここでは、ホソメコンブの被度 を仮根部の被度で示したために、最高でも1994年 7月に記録した22.1%であった。しかしながら、 景観的にはFig.14に示したように、この時期の永 久方形枠内は、ほぼ全面がホソメコンブの葉体で 覆われていることが分かる。本海域の永久方形枠 内のホソメコンブは1年生(川嶋、1991)と考え られ、被度は年によって大きく変化した。ホソメ コンブは春~夏季に被度が高くなり、夏~冬季に 低くなるのに対し、キタムラサキウニの密度はホ ソメコンブの被度が低下する季節に上昇するよう に両者は若干のずれをともなって連動していた。 すなわち、キタムラサキウニの密度はホソメコン ブ群落の衰退とともに上昇するという傾向を示し た。

3. 考察

海藻群落形成の妨害要因(磯焼けの持続要因) としてウニ類の摂餌圧は極めて重要であり,海藻 が繁茂しない磯焼け海域においても、ウニを除去 することによって海藻が繁茂することが多くの野 外実験や観察によって明らかにされている (Kitching and Ebling, 1961他)。磯焼けが顕著な 北海道南西部沿岸に位置する盃海域において広範



Fig. 23 Seasonal changes in the densities of *S.nudus* inside and outside of the permanent quadrates at Sakazuki and Tomari for the period from June 1994 to December 1996 (Dotsu *et al.*, 1999).

囲にホソメコンブ群落が形成されていることから (道津ら,1998),この海域におけるホソメコンブ 群落の形成要因を探ることを目的として,近傍の 磯焼け域である泊海域との生物,環境要因を比較 しながら3年間にわたるモニタリングを行った。

1)環境条件の比較

本章では、 盃海域にホソメコンブ群落が成立し ている原因を探るにあたり、 近傍の磯焼け域であ る泊海域と比較しながら、 波浪環境をもふくむ各 種無機的環境条件を周年的に調査した。その結果、 水温、 塩分、 栄養塩類等については両海域間の差 をみいだすことができなかった。

泊海域の永久方形枠上(水深4m)の日積算光 量子量は年間を通して盃海域の同一水深帯の値と ほぼ等しく、ホソメコンブが確認された最大水深 帯 6.2mよりも高い値で推移していた(Fig.17)。 ホソメコンブと光との関係に関する報告としては, 船野(1983)が実施した配偶体および幼胚体(幼 胞子体)の生残および生長に係わる上限近傍から 下限近傍の照度に関する実験がある。 船野 (1983)は、秋から冬に天然で生起しうる照度を もとに上限近傍から60,000~5,000luxの6段階,ま た,海藻被覆下の照度から下限近傍の照度として 100、50luxの2段階を設定し、実験を行った。そ の結果、下限近傍の値として設定した上記2段階 の照度においても配偶体の生存率に影響はみられ ず、幼胞子体の生長も認められた。今回調査を実 施した潮下帯のホソメコンブに対して問題になる のは光強度の下限である。泊海域4m層の12月の 光量子量2.3mol/m²/dayをluxに換算すると、ほぼ



Fig. 24 Seasonal changes in the density of *S.nudus* and cover of *Laminaria religiosa* inside of the permanent quadrate at Sakazuki for the period from June 1994 to December 1996 (arranged from Dotsu *et al.*, 1999).

1,350luxとなり、上記の設定値よりもはるかに高い値である。

以上のように今回の調査結果と,船野(1983) の実験結果より,ホソメコンブが生育していない 泊海域の永久方形枠周辺はホソメコンブが生育す る光条件を満たしているものといえる。一方,両 海域の波浪条件を波浪の軌道流速によって比較し た結果,盃海域は沖に向かって開放的で泊海域に 比べて波浪が発達しやすい環境にあり,季節風が 卓越する秋から冬にかけては,ホソメコンブ群落 が発達した水深4m以浅のマウンド上では,波浪 に伴う平均流速が1m/sを越える時化が長期間続き, 時に4m/s近くにもおよぶことが明らかになった (Fig.18)。

以上のように,調査を実施した様々な環境条件 の中で,盃,泊両海域で明らかに異なっていたの は,波浪(日平均流速)のみであり,複雑な海底 地形と波浪条件が盃海域のホソメコンブ群落の形 成に関与していると考えられる。

2) ウニの生物特性の違い

盃地先のキタムラサキウニと泊地先のキタムラ 地先のものに比べて初期の成長が良好であること が明らかとなった。これらのキタムラサキウニの 成長過程の相違の理由としては、餌料環境の違い が考えられる。Fuji(1967)は、1歳のエゾバフ ンウニでは、獲得したエネルギーの最も多くの部 分が殻成長に使われるが、2歳および4歳のもので は、生殖腺の成長に最も多く使われることを示し た。これらの結果より、盃地先では、若齢期にお いては、豊富な餌によって体成長が促進されるが、 ある程度大きくなると、餌料の多くが生殖巣の成 長に費やされることになり、最終的には両海域の 殻径がほぼ等しくなると考えられた。今回の両海 域における殻径40mm以上のキタムラサキウニの 生殖腺指数を比較すると、つねに盃海域の方が高 い値を示しており、両海域の植生の違いによる餌 料環境の差がキタムラサキウニの生殖腺の成長に 影響を及ぼしており、消化管内容物の強熱減量の 違いによっても海域の餌料環境の差が示されてい た。

3) ウニとコンブの季節的消長

盃海域の海底地形はきわめて複雑で、マウンド 上に盛り上がった場所にホソメコンブ群落が形成 されていた(Fig.14)。このマウンド上のホソメ コンブ群落内に設定した永久方形枠内のキタムラ サキウニの密度は,ホソメコンブの被度の変化に 若干の時期的なずれをともなって連動して変化し た。すなわち,春から夏にかけてホソメコンブ群 落の衰退とともに個体数が増加し,その後秋から 春にかけて減少するという特徴的な周期的変動を 示した。一方,永久方形枠外のキタムラサキウニ の密度は年間を通してあまり変化しないことから, 盃海域では,キタムラサキウニがマウンド上に設 定した永久方形枠とその周囲の窪地を周期的に移 動していると考えることができる。対照とした磯 焼け海域である泊海域では,キタムラサキウニは 多数生息し,永久方形枠内外ともに密度の季節変 動は小さかった。

本研究で示されたような、海藻の消長とキタム ラサキウニの季節的な移動に関する報告としては, 吾妻ら(1996),吾妻・川井(1997)の北海道忍 路湾における研究や、道津ら(1997)の発電所防 波堤上で実施した事例(第1章参照)がある。こ れらの報告はいずれも、キタムラサキウニの行動 に波浪が重要な影響をおよぼすことを示している が, 吾妻ら(1996)の研究は, 実験を実施した24 時間の波浪状況を風浪階級表をもとに波浪環境を 推測したものであり、吾妻・川井(1997)は、忍 路湾湾口部においてBeaufortの風力階級表をもと に年間の波浪環境を推測している。また、道津ら (1997)は、一部電磁流速計による測定を併用し たが、年4回の調査において、調査期間中を含む 数日間における各地点,各水深帯の波浪環境を石 膏の減少率から相対的に評価したもので、これら の調査ではいずれも周年にわたる定量的かつ連続 的な波浪観測は行っていない。

4) 盃海域におけるウニとコンブの消長と波浪と の関係

盃永久方形枠内における春から夏にかけてのキ タムラサキウニ密度の増加は、この時期が波浪の 弱い時期であることから、摂餌のための移動によ ると考えられる。ホソメコンブの被度とキタムラ サキウニの密度には時期的なずれがみられ、ホソ メコンブの繁茂初期の段階ではキタムラサキウニ の密度は低く、末枯れがはじまるころに蝟集して いる(Fig.20)。このことは、波浪の影響が少な くなると、水温の上昇にともなって、キタムラサ キウニの活動がしだいに活発化すること(吾妻ら、 1997)と関連している。

盃海域では,秋から冬にかけて大時化の状態が つづき,マウンド上の永久方形枠内のキタムラサ キウニの密度は低下した。前述のように、この時 期の波浪に伴う平均流速は1m/sを大きく上回る。 川俣ら(1994)の振動流水槽を用いた実験によれ ば、キタムラサキウニの移動限界流速は70cm/s、 摂餌限界流速は40cm/sである。野外におけるビデ オ観察においてもほぼ同様な結果が得られている が(谷野ら, 1994), この時期の盃海域の波浪流 速はこれらの流速をはるかに上回るものである (Fig.18)。したがって、キタムラサキウニはこの 時期の強い波浪を避けて,周りの深い場所へ逃避 したと考えられる。キタムラサキウニはマウンド 上に次年度のホソメコンブが着生し、生長する時 期まで周囲の窪地に生息している。このようなキ タムラサキウニの季節的移動の結果, 盃海域では ホソメコンブの遊走子の放出から配偶体を経て, 幼体の発生がみられる冬から春にかけて, 強い波 浪に起因してマウンド上におけるキタムラサキウ ニの密度は極めて低下し、このため、キタムラサ キウニの摂餌圧が低下する結果, ホソメコンブの 新規加入群が継続的に形成できると考えられる。 これに対して、磯焼けとなっている泊海域では、 盃海域と比較して波浪は周年低く、平坦でなだら かな傾斜の地形となっており,また永久方形枠内 外のキタムラサキウニの密度は周年にわたりほぼ 10個体/m²と高かった。このため、泊海域では周 年高い摂餌圧が維持していると考えられ、ホソメ コンブ群落の形成が妨げられている結果, 磯焼け が持続しているとみなされる。

5) 盃海域におけるホソメコンブ群落の形成機構

以上の結果をもとに、盃海域において想定され るホソメコンブ群落の形成機構をFig.25に示す。 磯焼けが進行している北海道南西部沿岸の中で、 盃海域にホソメコンブ群落が形成される要因とし て、まず、同海域が開放的で波浪環境が非常に厳 しいことがあげられる。さらに、ホソメコンブが 生息しやすい水深5m以浅の海底地形が起伏に富 んでいることから、マウンドではホソメコンブの 新規加入の時期に、波浪によってキタムラサキウ ニの侵入が抑制されることにより摂餌圧が制御さ れる。これらの結果、ホソメコンブ群落が形成さ れるということになる。その後、ホソメコンブが 十分に成長すると多くの餌をキタムラサキウニに 供給でき,また,海底基盤から離れて流れ藻となっ たホソメコンブは,マウンドの間の窪地に集積し キタムラサキウニの餌となる。

今回の調査で示された海藻の群落形成に及ぼす 物理環境のうちで,波浪による攪乱の影響につい ては、前出の吾妻ら(1996),吾妻・川井(1997), 道津ら(1997)の他にも大時化の前後の海中林の 群落構造の変化(Cowen et al., 1982)等の報告 があり、川俣(1994)は磯根漁場造成に関する総 説の中で波浪環境の重要性を指摘している。磯焼 け地帯においても, 盃海域のように波浪が高く地 形の複雑な場所では,波あたりの強いマウンドと 波浪の影響の弱い窪地をキタムラサキウニが移動 することにより,ホソメコンブの付着やその生長 期間にキタムラサキウニの摂餌圧が軽減されるこ とでホソメコンブの群落形成に好適な条件がつく り出されると結論される。以上のように、適切な 時期にキタムラサキウニの密度を制御することに よって,海藻の繁茂が期待できることが明らかと なった。 盃海域の場合, その特徴的な波浪条件と 地形条件によってキタムラサキウニの分布密度が 調節され、ホソメコンブ群落が維持されているも のと考えられる。



Fig. 25 Schematic illustration for the mechanism of the formation of kelp beds at Sakazuki area (Dotsu *et al.*, 2002a).

第3章 電極を用いたウニ排除による コンブの造成実験

第2章では、ホソメコンブが繁茂する盃海域に おける生物・環境の実態を近傍の磯焼け海域であ る泊海域と比較することによって、盃海域では波 浪と地形の効果によってホソメコンブの新規加入 の時期にキタムラサキウニの摂餌圧が抑制され、 ホソメコンブ群落が維持されていることを明らか にした。このことから、適切な時期にキタムラサ キウニの摂餌圧を制御することにより、コンブの 繁茂が期待できる可能性が示された。ここでは、 これらの成果を基に、電極板(電気牧柵技術)を 用いてウニの行動、摂餌圧を人為的に制御するこ とによってコンブ場の造成を行うことを目的とし たフィールドおよび室内実験の結果を示した。

1. 電気牧柵技術の概要

電気牧柵技術は,港湾構造物の電気防食や電着 防食等の際に利用される外部電源の陽極に生物が 付着しないことに着目して考案されたものである (熊田・佐々木,1988)。陰極となる鋼構造物に対 向して海水中に陽極を設置し,直流電源装置を介 して両極間に直流の微弱電流を流すと,次式に示 すように海水電解により陽極の表面に酸性の薄い 皮膜(次亜塩素酸HCIO⁻)が形成される。

海水電解のアノード反応による酸性皮膜の生成 ①2Cl⁻ \rightarrow Cl₂ \uparrow + 2e⁻ ②Cl₂ + H₂O \rightarrow HClO⁻ +H+ +Cl⁻

この酸性の物質は、海水電解によるアノード反応(陽極反応)によって海水中に溶存する塩素イオン(Cl⁻)が塩素ガス(Cl₂)になり、この水溶性の強い微細気泡ガスが海水に溶けて次亜塩素酸(HClO⁻)になったものである。この酸性の皮膜の厚さは陽極表面から約100µmと薄く、海水中に拡散希釈されて再び元の塩素イオン(Cl⁻)に戻る。陽極表面における酸性物質の皮膜の厚さや生成量は直流電源装置から供給される電流量にほぼ比例し、付着生物の浮遊幼生やアワビ、ウニ、ヒトデ等の大型動物の陽極板への付着行動を電流量(電流密度)によって制御することができる。一般に、生物付着防止効果が期待される陽極の電流密度は、フジツボ類、ムラサキイガイ等の浮遊幼生については約0.1A/m²、アワビ類、ウニ類、ヒ

トデ類等の大型動物については約0.1~0.5A/m²で ある(佐々木,未発表)。しかし、潮流や波浪等 によって陽極表面に形成される酸性物質が拡散希 釈されるため,季節的な水温変化や日照変化によ る付着生物の活力の違いを考慮して陽極の電流密 度を0.1~3.0A/m²の範囲内で調整することになる。

陽極材料については, 普通鋼やアルミ合金等の 溶性型のもの、シリコン鋳鉄や黒鉛等の難溶性型 のもの、チタン電極等の不溶性型のものに大別さ れる。電気牧柵のように陽極表面の酸性皮膜の生 成機能を長期維持するためには、一般に苛性ソー ダ等の食塩電解に多く用いられているチタン電極 のような加工性、施工性、耐久性に優れた不溶性 型のものが望ましい。チタン電極は導電体となる チタン母材の表面に海水電解させるための白金族 系貴金属をコーティングしたDSE電極とよばれる ものである。チタンは導電性の材料であるが通電 すると表面に不導体被膜が形成され海水電解は起 こらないため、通電しても減耗することはない。 チタン母材の表面にコーティングされる白金族系 貴金属は海水電解に対して不溶性のため耐久性に 優れているが高価である。そのため、電気牧柵の 構造形状については、例えば陰極となる鉄筋コン クリート製の床盤の縁辺部に高さ約10cmのチタ ン電極板を張り巡らせ、バリア効果が発揮できる ようにチタン電極の表面積および断面積が最小限 に抑えるような工夫が必要となる。

2. 現地実験

1) 実施海域

実験施設は先の泊海域の永久方形枠の近傍,北 海道泊村の小湾内の水深4mの場所に設置した (Fig.26)。実施海域は顕著な磯焼け海域となって おり,ホソメコンブの生育は波打ち際のごく浅い 場所に部分的に見られるのみで,施設設置水深 (4m)においては,ホソメコンブの生育は認めら れなかった。

2)施設の概要と観察方法

本施設の原型は,前述の電気牧柵技術を用いて 三井造船株式会社が開発した「アワビ保育牧柵施 設」である。アワビ保育牧柵施設は,海底に牧柵 となる電極板(陽極)を張り巡らせ,牧柵の内側 に放流したアワビの散逸を防止しながら稚貝を保 育する養殖施設である。本研究では,この電極板 の遮蔽効果を逆に利用し,施設内へのキタムラサ キウニの侵入を防止することによって,ホソメコ ンブの増殖を試みた。

実験施設の概要をFig.27に模式的に示す。5m× 5m×0.3mの平坦なコンクリート板の周囲の縁に チタン製の電極(陽極)を取り付けた。電極は直 流電源装置に接続されており,5V-10Aで通電し た。さらに,ホソメコンブの繁茂を促すために, 施設の上部に50cm×50cm×20cmのコンクリート ブロック16個を配置し,このうち8個については, 表面に2cm×2cmの溝加工を施した。なお,実験 施設との比較のために電極板のない同様な施設 (対照施設)を隣接して設置し,それぞれの施設 について毎月1回のモニタリングを実施した。

3) 結果

(1) 実験施設内外へのウニの移動状況

実験施設内から周辺へ,また,周辺から施設内 へのキタムラサキウニの移動状況をFig.28に示す。

1997年の8月に施設を設置し通電を開始した。 ホソメコンブの新規加入前の9月には,電極の効 果を見るために施設内に250個体(10個体/m², 磯



Fig. 26 Location of experimental facilities.

焼け海域の一般的なウニの密度)のウニを投入したが、1ヶ月後の観察時には施設内のウニは殆ど 周辺へ逸散していた。さらに10月に同様の投入を 行ったところやはり殆どのウニは施設外へ逸散し、 電極の効果が危惧される結果となった。そこで、 コンブの子嚢斑が形成され、新規加入が開始され る11月以降は、施設内のウニを全て排除するとと もに、周囲のウニの密度を10個体/m²に調整し観 察を継続した。その結果、周囲から施設内へのウ ニの侵入を阻止することができることが示された (Fig.28)。なお、2月から3月の観察の間に停電事 故のために、一時的に電気の供給が停止する事態 が生じた。その結果、3月の観察時には周囲から 施設内へのウニの侵入が認められたが、このこと は電極の侵入防止効果を実証する結果となった。

この"施設の中から周囲へのウニの移動はある が、周囲から施設内への侵入は阻止される"とい う現象の理由については、施設が周囲より高いこ と、電極が施設基盤の垂直面にあることと関係し ているものと考えられ、室内実験による検証を実 施することとした(次項)。

(2) ホソメコンブの繁茂状況

それぞれの施設上面におけるホソメコンブの最 大葉長と密度の推移をFig.29に,1998年6月の観 察時における両施設のモザイク写真をFig.30に示 す。1998年の2月にはどちらの施設にも小さなコ ンブの芽生えがみられたが,翌3月には対照施設



Fig. 27 Sketch of the test facility composed of a flat square concrete plate $(5m \times 5m \times 0.3m)$. 16 small concrete blocks $(50cm \times 50cm \times 20cm)$ were set on the facility so that the kelp might make it easy to grow. A slip shaped titanium electrode (anode) fixed around the edge of the facility. The electrode was connected to the output of 5V of DC converter placed on the breakwater of a fishing port near by. Control facility without electrode was placed in the neighborhood (Dotsu *et al.*, 2002a).

ではウニの侵入によりコンブはほぼ全滅した。一 方,実験施設ではコンブ等の海藻が繁茂し,11月 には子嚢斑の形成もみられた。この実験結果より, 電極を用いてコンブの捕食者であるウニの行動と 摂餌圧を制御することが可能であること(Fig.28), また,その結果,通常はウニの摂餌圧によってコ ンブが生育できない場所においても,コンブ群落 の形成が可能であること(Fig.29,30)が明らか となった。

3. 電極によるウニ排除機構に関する室内実験

前節では海域におけるモニタリングの結果をも とに、電気牧柵(熊田・佐々木、1988)を用いて ウニの摂餌圧を人為的に制御することによる、コ ンブ群落の造成実験を試みた。そして、①電極で 囲った実験藻礁の内側から外側へのウニの移動は 起こるが、外側から内側への侵入は防止できるこ と、②その結果、藻礁内部には、ウニが分布しな い状態を形成することができることを確認し、③ 実験藻礁内にコンブ群落を人工的に造成すること ができた。しかしながら、この現地実験の結果は、 月一回の藻礁内外のウニの分布状況の潜水観察結 果によって得られたものであり、電極に対するウ ニの行動の観察等は実施しておらず、藻礁内から 周囲への一方向のみウニの移動が可能であるとい う理由については、今後の課題となっていた。そ こで, 電極を装備した小型の実験藻礁の模型を作



Fig. 28 Number of S.nudus having migrated from test facility to surrounding or surrounding to the facility. In September and October 1997, 250 individuals of the sea urchin (10 ind./m2) were released on the facility (A), and after that, all sea urchins were monthly removed from the facility, and the density in the surrounding was arranged to 10 ind./m² (B). Positive numbers indicate sea urchin migration from the facility to surrounding, and negative ones from surrounding to facility (Dotsu *et al.*, 2002a).

成し、室内実験下でウニの行動を観察し、電極に よるウニの侵入防止効果、電極で囲まれた藻礁内 からのウニの脱出メカニズム等について検討した (道津・佐々木, 2005)。

1) 材料と方法

(1) 実験装置の概要

施設の概要をFig.31に示した。装置は、陽極 (DSE電極),塩ビ製の土台,金網製の陰極より構 成されており,これらを容量約600LのFRP水槽内 に設置した。陽極は幅75mmの垂直面の裏表のみ 電極処理が行われており,この垂直面のみ排除効 果を発揮する。飼育水は上方より20L/分で注水さ れ,金網と水槽底面の間の約1cmの隙間を通り, 水槽底面の中心より排出される。陽極と陰極はケー ブルにより直流電源装置に接続されている。直流 電源装置によって,0~1Aの範囲の任意の値に電



Fig. 29 Seasonal changes in the maximum blade length (cm) and density (ind./m²) of *L.religiosa* at the upper surface of facilities (Dotsu *et al.*, 2002a).





流の設定が可能であるが、今回の通電時の試験で は、0.2A(0.67A/m²)に電流を設定した。なお、 非通電時の試験においては、陰極の金網の腐食を さけるために、陰極を撤去するとともに、土台の 下に厚さ約1cmの塩ビ製の板4枚を敷設し、土台 と水槽底面の間に飼育水交換のための隙間を確保 した。

(2) 供試材料

試験には2001年8月に北海道泊村地先で漁獲さ れたキタムラサキウニを用いた。ウニは購入後た だちに千葉県御宿の海生研中央研究所に移送し, 御宿の現地水温よりも5℃低い調温海水を用いて 流水条件下でアラメを餌として蓄養した。その後, 新潟県柏崎市の海生研実証試験場の飼育水温度が ウニの適温範囲内の20℃以下となったことを確認 した後,実証試験場へ移送し(2001年11月7日), 試験開始まで50L容パンライト水槽内において流 水条件下でウニ用配合餌料(日本農産工業株式会 社製,うに3号飼料)を餌として,試験開始まで



Fig. 31 Schematic diagram of the experimental apparatus (Dotsu and Sasaki, 2005).

蓄養した。試験開始時におけるウニの殻径は52.2
±6.3mm(14個体の平均と標準偏差)であった。

(3) 牧柵内へのはいあがり試験

牧柵内への侵入防止効果を実証することを目的 として「牧柵内へのはいあがり試験」を実施した。 試験は非通電時,通電時それぞれについて行った。 「非通電時のはい上がり試験」は,後述の通電時 の試験における電極の効果を明確にするために, 電極に通電しない場合に餌を土台上に添加すると ウニが土台上まで摂餌のために移動することを実 証することを目的とした。また,「通電時のはい 上がり試験」は,電極に通電した場合には餌を土 台上に添加してもウニが土台上まで摂餌のために 侵入することはできないことを実証することを目 的とした。

それぞれの試験にあたってはパンライト水槽の ウニ14個体を試験水槽に移し替え,数日間のあい だ試験水槽内で飼育した。試験前日までは,2日 に1回,サイフォンにて残餌を除去後底面に投餌 した。試験開始時には残餌を全て除去し,全ての 個体が水槽底面に付着していることを確認ののち, ウニを誘引するために土台の中央部(牧柵内部) へ配合餌料50gを配置した。試験開始の後,一定 時間ごとにウニの位置を観察するとともに状況を VTRに記録した。非通電時の試験は2001年12月11 日より12月12日まで,通電時の試験は2002年1月 10日より24日までの14日間実施した。

(4) 周囲への脱出試験

野外実験の結果をうけて、電極に通電した場合 においても、土台上に放流したウニが周囲へ脱出 する可能性がありうることを実証するために本試 験を実施した。試験開始までパンライト水槽で蓄 養したウニを土台の中央部に1~2個体ずつ放流し、 縁辺(電極との接点)までの到達時間およびその 後の状況を観察するとともに、ウニの行動をVTR に記録した。試験は通電時のみとし、2001年12月 27日および、2002年1月9日~1月10日にかけて合 計13回(14個体)の試験を実施した。

2) 結果

(1) 非通電時のはいあがり試験

試験開始後の各観察時のウニの分布状況をFig. 32に示した。試験期間中の水温は17.9-18.4℃であった。開始後1時間目までは、全ての個体が底面上 に分布していたが(Fig.32a)、2時間目には2個体 が壁面を登り始め(Fig.32b)、3時間目には1個体 が電極を乗り越え,土台上面に到達した(Fig.32 c)。その後,数個体のウニが餌を求めて土台上面 に移動するようになり(Fig32d-h),約32時間後 には,8個体のウニが電極表面もしくは電極の内 側の土台上面へ侵入した(Fig.32i)。試験結果よ り,電極に通電を実施しない状態で餌を土台上に 添加するとウニが土台上まで摂餌のために移動す ることが確認された。

(2) 通電時のはいあがり試験

試験開始後の観察時のウニの分布状況をFig.33, 34に示した。試験開始後5日目には,飢餓のため, 陰極の金網表面に析出したCaCO₃をかじりとる個 体がみられ,水槽底面にはCaCO₃の断片およびウ ニより排泄されたCaCO₃を含む白い糞が散在する ようになった(Fig.34b)。6日目には,土台の垂 直面から電極へアタックする個体がみられたが, 電極を越えて内側へ侵入することはできなかった (Fig.33d, 34c)。この通電時のはいあがり試験に おいては,開始から試験終了時の14日目まで電極 を越えて土台上面に侵入する個体は1個体も認め られなかった(Fig.33a-g)。試験終了後通電を停 止して観察を継続したところ,約2時間後には1個 体が土台中央部で摂餌を行う様子が観察された (Fig.33h, 34e)。

(3) 周囲への脱出試験

試験結果をTable 9に示した。第1回目の試験では、ウニ2個体(1-1、1-2)を土台中央に放流したが、2個体ともただちに外側に向かって移動を

開始し、放流後29秒で土台の縁辺(電極との境) へ到達し、1個体は33秒後に、もう1個体は34秒後 には電極に付着することができず、そのまま水槽 底面まで落下した。2回目の試験(1-3)では、30 秒で土台縁辺まで到達したが、その後数本の管足 を土台上面に付着させてぶら下がった状態となり、 この状態がしばらく継続した後、徐々に1本ずつ 管足が土台より離れ、104秒後に最後の管足が土 台から離れて水槽底面へ落下した。その後の試験 でも、1-4、2-2をのぞき同様な経過をたどり、水 槽底面まで短時間のうちに落下した。放流から縁 辺までの到達時間は平均40秒、落下までの時間は 平均98秒であった(1-4、2-2の結果を除く)。

1-4の個体は放流後土台上面をランダムにはい 回った後,6分12秒後に土台の角に到達した。7分 10秒後には、管足十数本を土台上面に付着させた まま角の垂直部に移動した。12分32秒には最後の 管足が土台上面より外れたにもかかわらず脱落す ることはなかった。これは、垂直部の接合部分が 電極処理されておらず、この接合部分に管足を付 着させていたためであった。その後、14分07秒後 には角の下部先端にぶら下がった状態となり、放 流後14分24秒に落下した。2-2の個体は放流直後、 土台上面に管足を張り巡らせ静止した。それ以降、 19時間の間そのままの状態で全く移動することな く推移したため、土台表面まで水を排水し、ウニ を撤去した。今回の脱出試験の結果、事例1-4、 2-2の場合をのぞき、電極内側へ放流したウニは

Date	Time	Individual number	Time to reach the edge (sec.)	Time to fall down (sec.)	Note	Temperature (℃)
Dec.27,2001	14:00	1-1	29	33	Two urchins were released	13.9
		1-2	29	34	at the same time.	
		1-3	30	104		
		*1-4	372	864	Urchin moved to the corner of the mound	
		1-5	22	26		
Jan.9, 2002	14:10	2-1	70	180		13.9
		*2-2	-	-	Urchin was remaining in the center of the mound for nineteen hours.	
Jan.10, 2002	11:00	3-1	24	31		14.8
		3-2	42	155		
		3-3	43	123		
		3-4	35	149		
		3-5	45	65		
		3-6	67	216		
		3-7	48	56		
		Max	70	216	_Excluding the case of *mark	
		Min	22	26	_trials	
		Average	40	98	_	
		S.D.	16	66		

Table 9 Results of escape experiments (Dotsu and Sasaki, 2005)



Fig. 32 Distribution of S.nudus at the invading experiment in non-energizing (Dotsu and Sasaki, 2005).



Fig. 33 Distribution of S.nudus at the invading experiment in energizing (Dotsu and Sasaki, 2005).

ただちに移動を開始し、電極にふれると付着力を 無くして落下することが明らかとなった。

4. 考察

現地におけるホソメコンブ造成実験の結果,電 極を用いてコンブの捕食者であるキタムラサキウ ニの行動と摂餌圧を制御することが可能であるこ と,また,その結果,通常はウニの摂餌圧によっ てコンブが生育できない場所においても,コンブ 群落の形成が可能であることが明らかとなった。 また,この施設の特性として,電極板をはさんで 構造物の中から外へのウニの移動は容易に起こる が,外から中への移動はほとんど起こらないこと が明らかとなった。この理由を,施設が周囲より 約30cm高くなっていること,電極が施設基盤の 垂直面にあることと関係しているという想定のも と,室内実験による検証を行った。

室内における牧柵内へのはいあがり試験の結果 からは、電極に通電しない場合、水槽底面に配置 したウニは土台中央部に餌を置き誘引することに よって、数時間から1~2日の間に牧柵内へ侵入す るが、通電した場合には、2週間の試験期間の間、 完全に侵入を防止することができた。また、土台 中央部にウニを放流した脱出試験の結果では、ウ

ニは一般に比高の低い場所や陰となる場所へ移動 しようとする傾向をもつことから, 電極に通電し たにもかかわらず, 土台上からより低い水槽底面 をめざして逃避する行動を示した。そして平均40 秒で土台の縁辺(電極との境界)に達し,電極に 触れた場合でもこれを忌避することなく、底面へ 移動しようと試みた。しかしながら、電極には付 着することができず、そのまま自重によって落下 した。放流から落下に至るまでに要した時間は平 均98秒であった。これらの結果より、海域で実施 した藻礁実験(道津ら, 2002a)におけるウニの 分布状況の観察により想定された"藻礁内から周 囲への1方向のみウニの移動が可能である"とい う電気牧柵藻礁の特性を実証することができた。 電気牧柵と同様な考え方に立った食害防除柵とし ては、川井ら(2000)の刺し網フェンス方式や菊 池・浮の空気溜め方式(公開特許広報,昭62-166826) などがあるが、これらはいずれも両方向 の移動を阻止するものであり、一旦フェンスの内 側にウニが侵入した場合には、フェンスがウニの 外部への移動を阻止する方向に働き,何らかの方 法でウニをとりのぞかないかぎり、ウニはそこに 留まることになる。それに対して、電気牧柵を用 いた場合には、何らかの理由でウニが内部へ侵入



Fig. 34 Result of invading experiment in energizing. a : Experiment start, fed 50g at the center of the mound. b : Five days after, sea urchin grazed CaCO₃ generated from cathode. White excrements were scattered. c : Six days after, an urchin which tried to get over the electric fence. d : 14 days after, experiment end electricity off. e : 14 days after, one sea urchin got over the electric fence and fed on the mound (Dotsu and Sasaki, 2005).

しても、ウニはより低い場所へ移動する傾向を示 し、土台の垂直面に設置された電気牧柵はウニの 障害となることなく、外部へ落下する。その結果、 ウニを除去することなく、牧柵内をウニがいない 状態に保つことができると考えられた。なお、先 に北海道泊村地先で実施した現地実証試験では、 2.4A/m²(電流9.5A,電極表面積4m²)の電流密度 条件下で実験を行ったが、今回は、さらに弱い 0.67A/m²条件下で効果をあげることができた。今 後は、電流密度と防止効果の関係を明らかにする とともに、藻食性巻貝などの基質への付着方法の 異なる生物に対する効果についても実験を行う必 要があると考えられる。

第4章 ウニとコンブの棲み分けを考慮した 海岸構造物の提案

第4章では、これまでの発電所構造物周辺や天 然岩礁域における現地調査および電着技術を用い て実施した藻礁実験の成果をもとに、岩礁域に生 息する生物群に影響を及ぼす環境要因のうち、構 造物の工夫によって制御可能な要因を抽出した。 さらに、制御効果と構造物による制御方法を整理 することにより、発電所の海岸構造物およびその 周辺をより好適なウニ類生息場として活用するた めの方策を示すとともに、新規構造物の提案を行っ た。

1. 分布を規定する環境要因と構造物による制御

ウニ、アワビ、サザエ等の岩礁域に生息する藻 食性の水産動物の増殖のためには、餌となる海藻 類の繁茂が不可欠であるが、これらの藻食動物は 海藻の捕食者でもあり,海藻の群落形成に影響を 及ぼす。特にウニ類はその大きな摂餌圧により, 磯焼けの持続要因として知られている。したがっ て、海域の生産性の向上のためには、海藻と藻食 動物の関係を適切に保つ必要があるが、この海藻 と動物の関係は、各種無機環境要因の変化に支配 される動的な関係と考えられる。これらの岩礁域 生物の生残や成長を左右する環境要因には、生物 的要因および物理・化学的要因が考えられるが, これらの要因のうち、海岸構造物によって制御可 能な要因は限られている。そこで、海藻や藻食動 物などの岩礁域生物の増殖に影響を及ぼす環境要 因および海岸構造物の工夫による対処方法を整理 してTable 10に示した。なお、対処方法について は実現の可能性の度合いにより区分した。

1) 生物的要因

コンブなどの海藻に対してウニなどの藻食動物 は捕食者として働き,その摂餌圧が過剰な場合は 群落の形成に壊滅的な影響を及ぼす。一方,海藻

 Table 10 Environmental factors that affect the condition of rocky benthic organisms and methods and difficulty of the control of each factor by contriving artificial structures (Dotsu et al., 2002a)

	Environmental factors	Effect on seaweeds	Effect on animals	Methods and difficulty of control by contriving the structure*
Biological	animals (herbivorous)	overgrazing	-	• separation of habitats
factors	seaweeds (prey)	-	growth and survival	
Physical	light	growth and maturation	-	• bottom up and addition of horizontal spaces
	growth wave (absorption of nutrients)		inhibition of grazing activity	• bottom up
and	substratum	supply of habitat	supply of habitat	addition of new spaces
chemical factors	water temperature	growth and maturation	growth, survival and grazing activity	\triangle use of thermal effluents
	salinity	growth and survival	growth and survival	×
	nutrients	growth	-	X
	turbidity	growth, maturation and survival	-	×

*: \bullet = capable \triangle = slightly difficult \times = difficult

はエネルギーの供給源として, 藻食動物の成長や 生残に影響を及ぼす。このように, 海藻と藻食動 物はたがいに影響をしあい, 両者の捕食-被食の 関係の中で,後述の物理・化学的要因がどちらに 優位に働くかによって海域の生物相の状態が決定 される。

藻食動物を排除することによって海藻が繁茂す ることは、古くからの実験的な研究によって実証 されており (Kitching and Ebling, 1961他), 我が 国でも北海道水産試験場(吾妻ら,1997)等によっ て、ウニを排除することによる海藻類の繁茂が可 能であることが確認されている。本研究において も、キタムラサキウニの摂餌行動が波浪等によっ て抑制されることによってホソメコンブ場が成立 すること(道津ら, 1999), 電極板によってウニ の食害を防ぐことによって、ホソメコンブが繁茂 できること(道津ら, 2002a)が示された。発電 所や港湾等の周辺海域の好適化のためには、海藻 と藻食動物がバランスよく生息することが重要と 考えられるが、実際の海域において問題となるの は藻食動物が過剰となり、いわゆる磯焼け状態を 示す場合である。従って,ここでは,ホソメコン ブをはじめとする海藻を繁茂させるという立場か ら検討することとする。

2)物理·化学的要因

物理・化学的要因の中で、構造物の工夫によっ て改善可能なものとしては、光、波浪、基質が考 えられ、塩分、栄養塩、濁りの制御は現実的には 非常に困難と考えられる。ここでは、これらの要 因のうちで、光、波浪、基質が生物に及ぼす効果 を整理するとともに構造物による対応方法につい て検討を行う。

(1) 光

① 光の効果

光は光合成を行う藻類にとって必要不可欠な要素である。光合成速度は、光強度が増加するとともに直線的に上昇するが、飽和照度になると定常値に達する。また、非常に強い光は阻害的に働くことが知られているが(Darley, 1982)、ホソメコンブに関しては、磯焼け海域においても潮間帯のごく浅い場所に分布が見られる場合があること、海域の光強度は水深とともに指数関数的に減少することを考慮すると、潮間帯以深にコンブ場を造成する場合には光はより強い方が良いということになる。一方、ウニ類等の藻食動物の多くは反走

光性をもつ傾向がある。Fuji(1967)は、エゾバ フンウニの摂餌行動を観察し、晴天時の昼間は著 しく摂餌活性が低くなるが、夜間に活発に摂餌す ることにより、晴天時と曇天時の日間の摂餌量に は大差がないことを示した。

以上の結果より, コンブに対する強光阻害がお こらない範囲では光の強化はコンブの成長に有利 に働き, ウニに対してはその影響は比較的少ない ものと考えられる。

2 目標値

今回のモニタリングにおいて, 盃海域では水深 6.2mまでホソメコンブの分布が確認されており, 特に本種の成長の時期にあたる1月から5月頃まで の光量がこの水深帯の光量(1.4~14mol/m²/day, Fig.17)を充たしていればホソメコンブの成長は 可能である。しかし,強光阻害を受けない範囲に おいては,光が強いほどコンブの成長は促進され, 当海域(盃および泊海域)におけるホソメコンブ の繁茂状況は水面際で最も良いことから,水面際 における光量子量(Io)(5.3~31mol/m²/day)を 目標値として考えることができる。

③ 構造物による制御

強光阻害がおこらない範囲においては,光の強 化は海藻の成長に有利に働き,藻食動物に対して はその影響は比較的少ないか,もしくは,活動を 抑制する方向に働くことから,光の強化はウニと コンブとの関係においては,相対的にコンブに有 利に作用すると推測される。よって,コンブの繁 茂を促すためには,生息基質表面の光を強くする ことが望ましい。海岸構造物を利用して,基質表 面の光環境を改善する方法としては,以下のこと が考えられる。

a. 基盤の嵩上げ:海中の光強度は水深ととも に指数関数的に減少することから,基盤の嵩上げ を行い,水深を浅くすることによって,光環境を 改善することが可能である。

b. 緩傾斜化,水平化:基質表面の光強度は太陽光との角度によって変化する。従来の垂直護岸に傾斜をつけたり,水平部分を確保することによって,表面の光強度を高めることができる。

(2) 波浪(流れ)

波浪の効果

波浪や流れによる水の動きは,定着性の動植物 の分布に影響を及ぼす最も重要で,かつ構造物の 工夫によって制御可能な要因の一つである。波浪 や流れによる水の動きは,定着性の動植物の分布

に影響を及ぼす最も重要で、かつ構造物の工夫に よって制御可能な要因の一つである。道津ら (1992)は、ホッキガイ漁場となっている福島県 沿岸海域において、砂浜海域の漁場造成のための 生態学基礎情報を得ることを目的としてのマクロ ベントスの分布状況を調査し、その結果、海域は、 岸から沖合にかけてAreaⅠ、Ⅱ、Ⅲの水深に沿っ た生物群集の分布区分が認められること、また、 海域に存在する発電所港湾内の静穏域にはこれら と異なった生物群集が認められることを示した (Fig.35)。最も浅い1においては、比較的大型で、 行動の活発な多毛類、ウバガイ(ホッキガイ)を 含む懸濁物食の二枚貝、そして潜砂行動が極めて 活発な特定の端脚類が分布していた。一方、最も 沖側のⅢにおいては、モップ状の棲管の束を形成 する多毛類, 堆積物食の二枚貝, そして, 極めて 多種の端脚類が分布していた。周囲を防波堤で囲 まれ、静穏域となっている発電所港内では、水深 が浅いにもかかわらず、最も沖合のⅢでみられた ものと同一種の堆積物食の二枚貝が分布していた (Table 11)。そしてこれらの生物分布状況を底質 環境と対比することによって、当該海域のマクロ ベントスの分布を規定する要因として, ①波浪の 生物に及ぼす物理的な影響, ②波浪によって形成 される浅所から深所への底質環境の変化が重要で あることを示した。

今回の調査で対象とした岩礁域においては、こ のうち①の波浪の直接的な影響が重要となる。岩 礁域においては、水の動きはウニなどの動物に対 しては行動を抑制する方向に働き、海藻に対して は基質から剥離されるほど強い場合を除いて好適 に働く。今回の発電所構造物および自然岩礁域に おける一連の調査結果からも藻食動物と海藻の相 互関係に及ぼす波浪の重要性が示された。道津ら (1997)は、発電所防波堤上のキタムラサキウニ の分布と波浪との関係を検討し、海域の波浪は、 ウニの行動の制御要因として直接的に, また, 海 藻の分布への影響を通して間接的にウニの分布に 影響を及ぼし、餌となる海藻を求めて上方へ向か う行動が波浪によって阻害され、波浪の強さの程 度によって防波堤上におけるウニの分布帯が決定 されることを示した。また、ホソメコンブ群落 (盃海域)の環境を近傍の磯焼け域(泊海域)と 比較し、波浪が強く地形の複雑な場所では、波当 たりの強いマウンドと波浪の影響の弱い窪地をキ タムラサキウニが移動することにより、コンブの 新規加入の期間にウニの摂餌圧が軽減されること で群落の形成が促されることを示した(道津ら, 1999)。

川俣ら(1994)は、振動流を用いたキタムラサ キウニのコンブに対する摂餌阻害実験によって、 移動限界流速が70cm/s,摂餌限界流速が40cm/sで あることを明らかにし、谷野ら(1994)は海域に ビデオカメラと流速計を設置して観察を行い、野 外におけるキタムラサキウニの行動に流速が影響 を及ぼすことを指摘している。

著者らも、キタムラサキウニに対する室内実験 によって、流速40cm/sで行動を停止する個体がみ られ、70cm/sで全ての個体が行動を停止し、50~ 110cm/sで剥離するという結果を得ている(海生 研、未公表)。

2 目標値

波浪は海藻の成長を促すとともにウニ類の行動 を制限する重要な要因であり、構造物の波浪環境 を制御することによって、ウニの摂餌圧を低下さ せ、海藻を繁茂させることが可能である。室内実 験条件下では40cm/s程度でウニの行動は影響をう けるが、野外においては、微細な地形の影響など を考慮し、ホソメコンブを対象とするならば、新 規加入時期に月平均で1m/s程度の流速が確保でき ることが望ましい。

3 構造物による制御

上記のように,動植物の生息場の波浪を強くす ることによって,両者の捕食-被食の関係は,海



Fig. 35 Sampling station and classification of area of investigation by similarity index (C Π) of macrobenthic community (I-III) of the sandy coastal area of Futaba, Fukushima (Dotsu *et al.*, 1992).

藻の方により有利に働くことになる。海岸構造物 の工夫により,海域の波浪環境を改善する方法と しては以下のことが考えられる。

a. 基盤の嵩上げ:海底面直上の波浪による水 の流れは、水深が浅いほど強くなることから、水 深を浅くすることによって、藻食動物の食害を軽 減することができる。

b. **潜堤**:防波堤にあたる波浪の軽減のために 用いられる潜堤の上面は必然的に波浪環境の厳し い場所となり,海藻の生息に有利な場所となる。

(3) 基質

基質の効果

構造物の投入は、必然的に岩礁域に生息する藻 食動物、海藻の双方に新しい生息場を提供する。 海岸構造物が果たす海生生物の生息場機能につい ては多くの事例が知られており(水産土木研究部 会、1976)、基質を投入することによって動物、 海藻ともに増殖効果が期待できる。

電力中央研究所(1993)では、メインテナンス フリーの藻場造成技術に関する検討を行い、その 前提条件として周辺に海藻群落が存在する砂地に 基質を設置することを提唱している。この場合、 対象海域は基質以外の海藻の生育のための条件は 整っており、基質の投入によって海藻の繁茂が期 待できることになる。

キタムラサキウニおよびエゾバフンウニの生息 域の地形的特徴についてはいくつかの知見があり (川村, 1960, 1973;富士, 1969, 1973: Fuji and Kawamura, 1970),岩礁,玉石,砂礫,転石地帯 にウニ漁場が形成されることが知られている。こ れらの報告によると,適応範囲は高齢群の方が広 い傾向がみられるが,安定した基質かつ複雑な形 状を備えた場所に多く生息する傾向がうかがえ, 砂礫,玉石底は生息に不向きなようである。今回 モデルサイトとして選定した泊発電所の防波堤上 には,多数のキタムラサキウニが生息しており (道津ら,1997),防波堤を構成するコンクリート 基盤および大型の捨て石はウニ類の生息基質とし て問題はない。

コンブ類の着生は,基質の安定度がある程度以 上であれば、天然物、人工物の如何にかかわらず 認められ、北海道沿岸各地に古くから行われてき た自然石投入によるコンブ漁場造成、あるいは 1956年(昭和36年)以降のコンクリートブロック を用いたコンブ漁場改良造成事業、延縄式施設に よるコンブ養殖などがそのことを裏付けている。 しかし、海域に生息するコンブ類の個体がどのよ うな形状、大きさの基質のどのような部位に着生 しているかについては、天然の着生基質に関する 知見は極めて少なく, コンクリートブロックにお いても多くない。著者らが盃海域において観察し た結果では、ホソメコンブ着生のためには、投影 面積600~900cm²(直径30~35cm)以上の基質が 必用と考えられた(海生研,未公表)。船野・石 川(1965)および川嶋・佐々木(1973)が実施し たコンクリートブロックにおけるコンブの着生位

Area and Depth	Polychaeta	Bivalvia	Gammaridea
I (5.4-12.5m)	Large Errantia, well-developed in motive capacity • Glycera rouxii • Diopatra sugokai • Nephtys sp.	Suspended feeder • Spisula sachalinensis • Mactra crossei	Extremely rapid in sand- burrowing movement • <i>Metaphoxus</i> sp.
II (9.2-14.4m)	Comparativelly small Errantia and Sedentaria • Goniada sp. • Prionospio sp. • Haploscoloplos elongatus	Suspended feeder • Siliqua alta	Rapid in sand-burrowing movement • Urothe sp. • Synchelidium miraculum lenorostram
III (14.5-32.7m)	 Making up mop-like bundles of tubes Spiophanes bombix Ampharete sp. Owenia fusiformis 	Deposit feeder • Yoldia johanni • Macoma plaetexta • Alvenius ojianus • Acila insignis	 Abundant in number of species and individuals S. miraculum lenorostram Eohaustorius sp. Many species of Ampeliscidae and Isaeidae
Inside of the port (6.1m)	Sedentaria • Abarenicola pacifica • Maldanidae	Deposit feeder • Yoldia johanni • Macoma plaetexta • Alvenius ojianus	Almost absent

Table 11 Diagnostic characters of species observed in each area at the sandy coastal area of Fukushima (arranged from Dotsu *et al.*,1992)

置に関する詳細な観察結果によると,着生様式は 様々であるが,ブロックの上面,特に上向きの角 に多く,底面の砂地に近い位置には着生しにくい ようである。着生様式に変化が生じる原因として は,潮の流れや光が関係するとされているが,具 体的な因果関係は不明である。

今回の電極を用いた藻礁実験では、構造物上に 50cm×50cm×20cmの上部構造物を16個配置し、 そのうち半数の構造物上に溝を刻んだが、発生し たホソメコンブのほとんどが上部構造物上に付着 しており、下部の水平面にはほとんど付着がみら れなかった。また、溝の有無による差はほとんど 認められなかった。

藻礁などの人工的な基質投入で問題となるもの に、"基質の劣化"がある。これは、材質そのも のの劣化を示すものではなく、海藻の着生状況の 経年的な変化を指すものである。一般に人工基質 の投入を行った当初は海藻が繁茂するが、次第に その量が減少していくことが知られている。設置 後数年を経たコンクリートブロック礁のコンブ着 生状況が劣化する現象を最初に明らかにしたのは、 中村(1960)で、その後、船野・石川(1965)が、 同じ北海道伊達湾虻田沿岸で再調査を行い、中村 の結果との比較検討を行った。また、船野・石川 (1967)は伊達町北黄金沿岸のコンブ礁において も同様の調査を実施した。これらの報告では、コ ンクリートブロック・コンブ礁は投入後3年目ご ろから雑海藻の侵入とともに、コンブの着生が減 少し、4年目ごろから周囲の天然岩礁に近い状態 になるとされているが、これらの報告では、侵入 してくる藻食動物との関連については検討されて いない。劣化現象の具体的なメカニズムについて は不明な点も多く、本研究においても積み残した 問題であり、今後の検討課題である。

構造物による制御

海域に新基質を投入する行為そのものが、岩礁 域生物の生息場の拡大となる。さらに表面形状を 工夫(複雑化)することによって、効果の拡大が 期待できる。本研究においては、電極板を装備し た実験藻礁に四角い上部構造物を配置することで、 コンブ群落の形成を促すことができた。また、電 カ中央研究所では、藻類の着生と基質上の突起物 の角度との関係について検討を行い(寺脇,1988)、 繁茂を促すためのケルプノブという突起構造を提 案している(Hasegawa *et al.*, 1995)、海藻や動 物の生息を促すための表面構造の工夫については、 徳田ら(1991),マリノフォーラム21(1992)等, 人工漁礁の開発関連において検討されている。

2. 環境制御方法を考慮した海岸構造物の提案

前節では、ウニやコンブ等の岩礁域生物の増殖 にかかわる各種環境要因の中から、海岸構造物の 工夫によって制御可能な環境要因として、生物間 の相互関係、光、波浪、基質を選定し、それらを 制御することによって、どのような効果が期待で きるかを示すとともに、可能な場合は、その目標 値を整理した。ここでは、これらの環境要因の制 御方法を考慮した海岸構造物についていくつかの 事例を示す。

1) 潜堤付き防波堤

本研究における調査結果および既往知見をもと に,海洋生物環境研究所の事業の一環として長谷 川(1993)が提示した「潜堤付き防波堤」により 創造される空間をウニ類の餌料供給場,ウニ類幼 生の着底場およびウニ類の生息場として利用する 試案を以下に示す。

潜堤付き防波堤は、従来の港湾に用いられてい る消波ブロック被覆堤の消波ブロックを沖側に移 動して潜堤とし、防波堤にかかる波の力を少なく するとともに、防波堤と潜堤の間の空間を生物の 生息の場として利用しようというものである (Fig. 36)。

Fig.37に発電所潜堤付き防波堤によるウニ類増 殖場の概念図を示した。この試案では,餌料海藻 の供給場とウニ類の生息場を分離し,餌料海藻供 給の場として潜堤の上部を利用することとした。 潜堤上部は,水深のかさあげや水平面の増大によ る光や波浪,付着面等の増加によって,コンブや ワカメ等の海藻類の増殖が期待される。また,潜 堤の海中林は波浪によりウニ類の食害から保護さ れ(菊地,1978;川俣ら,1994),さらに,いった ん濃密な海藻群落が成立すると,群落内にはウニ 類の進入が阻害される(藤田,1989)。この海中 林から遊離した海藻は寄り藻となり,静穏域へ集 積し,ウニ類の餌となる。また,静穏時には,群 落の縁辺までウニが移動し,摂餌することが可能 となる。

次に防波堤と潜堤の間の静穏域がウニ類の生息 場として機能することが期待される。この静穏域 は,磯焼け状態になると考えられるが,磯焼け状 態は,ウニ類幼生の着底には悪影響を及ぼすこと はない(菊地, 1978)。この場所では,静穏化や 渦流の発生等により,ウニ類幼生の着底が期待さ れる。また,ここでは,波浪の減衰にともない, デトライタスの沈降がおこり,着底した幼生の餌 料(Fuji, 1967)となる。前述のようにこの場所 に生息する親ウニは,ある程度の移動力をもって いることから,静穏時には潜堤の海中林の縁辺部 まで策餌行動をとることが可能と考えられ,また, 海中林より脱落した寄り藻を餌として利用するこ とも可能となる。

2) プラットフォーム

この施設は、前述の潜堤付き防波堤の付帯構造 物として提示された施設である(道津ら,1996)。 本施設は防波堤の上部の一部を削り取り、その部 分を沖合に移動することにより、水深1~2mの水 平面を創るというものである (Fig.38)。プラッ トフォームの水平面は、水深が浅いことから、光 条件が改善され、海藻の成長がうながされると考 えられる。また、この場所では波浪環境も厳しく なり, ウニ類等の藻食動物の摂餌行動が抑制され, 海藻が繁茂しやすくなる。本研究において実施し た磯焼け海域の発電所防波堤垂直面上における潜 水観察の結果においても水面際には多くの海藻が 出現することが確認されたが(第1章, Fig.6), この水面際の海藻の生育帯を拡大することができ, また, 基質を水平にすることによりさらに海藻の 繁茂が期待できる。

3) 電極を利用した生息場分離型防波堤

第Ⅲ章では、電極板の遮蔽効果を利用し、藻礁 へのキタムラサキウニの侵入を防止することによ るホソメコンブの増殖を試みた。その結果、藻礁 内部へコンブ群落を形成させることができた。さ らに、室内実験によって電極に対するウニの行動 を観察した結果、海域で実施した藻礁実験により 想定された"藻礁内から周囲への1方向のみウニ の移動が可能である"という電気牧柵藻礁の特性 を実証することができた。ここでは、上記の成果 をもとに検討した、電極板を備えたウニとコンブ の生息場分離型防波堤の一例を示す(Fig.39,40)。 この構想は電極を境に上下2段に防波堤を分離し、 電極で囲まれた上段をコンブの養成場として、下 段をウニの生息場として利用するものである。

(1) コンブ養成場

防波堤上段のコンブ養成場は、電極(陽極)に

より藻食動物から守られる。また,水深が浅いこ とから,波浪も強くなるとともに光条件が良くな り,コンブの成長が促進される。仮にこの上段に 稚ウニが着底したり,一時的な電気の停止によっ てウニが侵入した場合でも,ウニは電極に触れる と付着力をなくし外へ落下するものと考えられる。 この上段の波浪がウニの剥離を促すほど(約1m/s) であれば,ウニの排除はさらに促進される。これ らのことによって,この防波堤上段ではメインテ ナンスをほとんど施さずにウニを生息させない状 態を保つことができると考えられる。

藻礁実験では方形の付着基質を配置したが、このコンブ養成場では、波浪によるウニの排除効果 を促すためにコンブの付着基質を菱形とし、表面 を陰極とした。藻礁実験では陽極の遮蔽効果のみ を検討し、陰極の効果については検討しなかった が、この技術の水産利用は、元々は陰極の電着物 「CaCO₃、Mg(OH)₂」の析出機能を利用した海中構 造物の形成効果を応用するものとして提案された ものであり(熊田・佐々木、1986)、陰極を上段 に付着基質として配置することによって、海藻の 着生効果がより期待される。この場所で成長した コンブは基質より離れて流れ藻となり、下の段に



Fig. 36 A schematic diagram of composite breakwater with detached submerged mounds (Dotsu *et al.*, 1996).



Fig. 37 A feasible application of composite breakwater with detached submerged mounds as the culture ground of the sea urchin (arranged from Dotsu *et al.*, 1996).

集積しウニの餌となるほか,遊走子の供給源として機能する。

(2) ウニの生育場

防波堤下段をウニの生育場として利用する。下 段は光が弱く波浪が穏やかなことから、ウニにとっ ては好適な環境が形成され、海藻類の繁茂は期待 できないが、上段から流れ藻として供給されるコ ンブによって、ここに生息するウニの餌料環境が 改善される。

電極で囲まれたコンブ養成場は、いくつかのユ ニットに区画されており(Fig.40),全てのユニッ トに周年通電することも可能であるが、一部は周 年通電し、コンブの遊走子の供給源とし、残りの 部分をコンブが十分に成長した時点で通電を停止 し、ウニを侵入させるというような使用方法も考 えられる。どのような方法が最も効率的かという ことについては、さらに検討する必要がある。

総合考察

港湾の防波堤や護岸などの海岸構造物上には, ウニ,アワビ等の有用生物が多数生息している。 これらの藻食動物は,水産生物である反面,コン ブなどの海藻類の食害生物としての側面を有し, 藻食動物の量が多すぎると海藻が枯渇して,いわ ゆる磯焼け状態を引き起こす。その結果,動物も 餌不足に陥り,海域の生産性も低下することにな る。海域の生産性の向上のためには,海藻類の繁 茂を促すということが重要となる。

本報告では、まず、北海道電力泊発電所の防波 堤におけるキタムラサキウニと植生の分布実態を 調査し、発電所防波堤には極めて多くのウニが生 息しているが、海藻植生は貧相でウニの餌料とし て有効なホソメコンブ等の大型海藻はほとんど分 布していないことから、ウニは慢性的な餌不足に よって、生殖腺の発達が抑制されていること、ま



Fig. 38 A schematic diagram of platform as an attached facility of culture ground of the sea urchin using composite breakwater with detached submerged mounds (Dotsu *et al.*, 1996).

た,ウニと海藻の分布は波浪環境と密接な関係を もつことを示した。

次に、このような北海道南西部沿岸の磯焼け海 域に立地された海岸構造物の実状を鑑み、コンブ とウニがバランスよく生息している好適な構造物 の実現をめざすこととした。発電所周辺海域を含 む北海道南西部沿岸は無節サンゴモ類が優占する 磯焼け海域となっているが、このような海域にお いても部分的にホソメコンブの群落が成立してい る場が存在する。本研究においては、好適な海岸 構造物の実現には、実際の自然海域における詳細 な観察が必要であると考え、自然海域においてホ ソメコンブとキタムラサキウニの共存する場所 (盃海域)と、磯焼けとなっている場所(泊海域) にそれぞれ調査場所を設け、両サイトの環境条件 の比較を行った。そして、盃海域では、厳しい波 浪条件と複雑な地形条件のため、マウンド上では、



Fig. 39 An unit of habitat separating breakwater system with electrodes. a;culturing space for kelp, b;cathode (substratum for kelp settlement) c;culturing space for sea urchin, d;concrete armor blocks, e;trap of drift algae, f;anode (inhibition of urchins invasion) (Dotsu *et al.*, 2002a).



Fig. 40 Outline of habitat separating breakwater system (Dotsu *et al.*, 2002a).

コンブの新規加入の時期にウニの侵入が抑制され ることにより摂餌圧が制御され,コンブ群落が維 持されていることを示した。さらに,これらの結 果をもとに,電気牧柵(電着技術)を用いて,人 為的にキタムラサキウニの摂餌圧を制御すること によって,通常は磯焼けとなっている泊海域にお いて,ホソメコンブ群落の造成が可能であること を実証した。

最後に、これまでの構造物や天然海域における 現地調査および電着技術を用いて実施した藻礁実 験の成果をもとに、岩礁域に生息する生物群に及 ぼす環境要因のうち、構造物の工夫により制御可 能な要因を抽出するとともに、制御効果と構造物 による制御方法を整理することにより、海岸構造 物およびその周辺をより好適なウニ類生息場とし て活用するための方策を示すとともに、ウニ(藻 食動物)とコンブ(餌生物)が共存する新規構造 物の提案を行った。

今回,検討を行った北海道南西部沿岸海域の岩 礁底は,一次生産者としてのエゾイシゴロモを主 体とする無節サンゴモ類とホソメコンブ,藻食動 物としてはキタムラサキウニが優占し,ウニに対 する捕食者は存在しないという比較的単純な群集 構造を形成している。

一方、本邦において藻場を構成する海藻類とし ては、ここでとりあげたホソメコンブのほかに、 マコンブ等の多年生のコンブ類、アラメEisenia bicyclis, カジメEcklonia cava, 各種ホンダワラ類, アマモ Zostera maria 等様々であり、生息する水 産生物も異なる。近年、本邦南方海域の磯焼けが 注日されるようになってきており、その原因につ いては、ムラサキウニ Anthocidaris crassispina の 食害(四井ら, 1993)等とともにアイゴ Siganus fuscescens 等の藻食性魚類による食害(桐山ら、 1999;中山・新井、1999;清水ら、1999)が重要 な要因となっていることが明らかにされつつある。 また、道津ら(2002b)は、南方海域の海藻植生 にガンガゼ類 Diadema spp. が影響をおよぼす可 能性を示した。本邦南方海域の岩礁底においては、 アラメ,カジメ等のコンブ科海藻と多種にわたる ホンダワラ類が複雑に混成し、多様な植生を形成 するとともに、様々な藻食動物が存在し、藻食動 物間の競合も考慮する必要がある。

本研究における基本的な考え方は,他の海域に おいても活用可能であると考えられるが,上記の ように海藻群落の多様性や藻食動物の種類および 海藻への関与のしかたなど異なる点も多く,他の 海域への適用の際には海藻群落の組成と主要種の 寿命,動物の摂餌選択性や波浪との関係等を考慮 しつつ,動物と海藻の関係について十分な吟味を 行うことが必要と考えられる。

なお、本研究は発電所立地にともなう環境対策 として発電所の有する潜在的な機能を積極的に活 用し、好適な海域環境を創生するための事業の一 環として実施されたものである。平成9年に環境 影響評価法が法制化され、同法で規定される事業 において、一定規模以上の事業において環境影響 評価が求められることとなった。このなかでは、 いままで実施されていなかった生態系への影響評 価が行われるとともに、同法の規定に基づく「環 境保全措置指針に関する基本的事項」にしたがっ て以下のように環境保全措置を検討することが示 された(環境省, 2001)。

①事業による影響が及ぶと予測され,環境保全 措置を講じる必要があると判断される注目種・群 集,重要な類型区分,あるいは生態系の機能に関 し,その影響を「回避」または「低減」するため の措置を検討する。

②回避または低減措置の効果が充分でないと判 断された場合、もしくは不可避の理由により回避 または低減措置が不可能とされた場合には、「代 償措置」を検討する。

本研究の成果は,港湾等の建設に伴う環境アセ スメントにおいて,この中で取り扱われる藻場生 態系における環境保全措置に関する具体的な方法 の一つとして,活用することが可能である。

なお,本研究で示した防波堤はあくまでも生物 学的視点から提案されたものであり,今回の結果 を新規発電所の立地計画やそれに伴う環境影響評 価のなかに適切に反映させていくためには,発電 所本来の機能を損なうことなく環境保全を行うた めの技術的な検討はもとより,地域のニーズと照 らしあわせ,経費と効果という総合的な検討を行 うことが必要と考えられる。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究のとりまとめに際 し、終始御懇篤なご指導とご助言を賜りました三 重大学生物資源学部柏木正章教授に謹んで感謝の 意を表します。また、三重大学生物資源学部,前 川行幸教授、古丸 明教授、吉岡 基助教授およ

び東京大学名誉教授, 平野礼次郎博士からのご指 導とご助言に感謝いたします。本研究の計画から 実施、とりまとめまで共に議論し、汗を流した財 団法人海洋生物環境研究所中央研究所,太田雅隆 所長代理および野村浩貴主査研究員に心からお礼 申し上げます。本研究の基礎となる各種論文のと りまとめにおいて有益なご批判とご助言をいただ いた,東京大学名誉教授,羽生 功博士,清水 誠博士および北海道大学名誉教授, 中尾 繁博士 に深謝いたします。現地の調査でご協力いただい た北海道電力株式会社,北海道原子力環境センター, 泊漁業協同組合, 盃漁業協同組合の各位に感謝い たします。また、現地実験施設の形状については、 川嶋昭二博士よりご助言をいただくとともに、施 設の設計と敷設に関しては三井造船鉄構工事株式 会社佐々木晴敏氏のご協力をいただきました。潜 水観察をはじめとする現地調査の実施に際しては 株式会社エコニクスのスタッフにご協力していた だきました。心からお礼申し上げます。本研究は 資源エネルギー庁委託事業の一環として実施され たものであることを付記し感謝の意を表します。

文 献

- 吾妻行雄・川井唯史(1997). 北海道忍路湾にお けるキタムラサキウニの季節的移動. 日水誌, 63, 557-562.
- 吾妻行雄・松山恵二・中多章文(1996). 北海道 忍路湾におけるキタムラサキウニの摂食活動 の季節変化. 日水誌, **62**, 592-597.
- 吾妻行雄・松山惠二・中多章文・川井唯史・西川 信良(1997). 北海道日本海沿岸のサンゴモ 平原におけるウニ除去後の海藻群落の遷移. 日水誌, 63, 672-680.
- 浅野昌充・菊地省吾・川村知彦(1990). コンブ 類繁茂に対する小型植食巻貝の影響. 東北水 研報, No.52, 65-71.
- Ayling, A. M. (1981). The role of biological disturbance in temperate subtidal encrusting communities. *Ecology*, 62, 830-847.
- Benedetti-Cecchi, L. and Cinelli, F. (1995). Habitat heterogeneity, sea urchin grazing and the distribution of algae in littoral rock pools on the west coast of Italy (western Mediterranean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **126**, 203-212.

- Bernstein, B.B., Williams, B.E. and Mann, K.H. (1981). The role of behavioral responses to predators in modifying urchins' (*Strongylocentrotus droebachiensis*) destructive grazing and seasonal foraging patterns. *Mar.Biol.*, **63**, 39-49.
- Breen, P. A. and Mann, K. H. (1976). Destructive grazing of kelp by sea urchins in eastern Canada. *J.Fish.Res.Board Can.*,**33**, 1278-1283.
- Chapman,A.R.O.(1981). Stability of sea urchin dominated barren grounds following destructive grazing of kelp in St.Margaret's Bay, eastern Canada. *Mar.Biol.*, **62**, 307-311.
- Cowen, R. K., Agegian, C.R. and Foster, M.S. (1982). The maintenance of community structure in a central California giant kelp forest. *J.Exp.Mar. Biol.Ecol.*, 64, 189-201.
- Darley,W.M.(1982). 藻類の生理生態学. 基礎微 生物学9, 手塚泰彦, 渡辺泰徳, 渡辺真利代 共訳, 培風館, 東京, 200pp.
- Dean, T. A., Schroeter S. C. and Dixon, J. D. (1984). Effects of grazing by two species of sea urchins (*Strongylocentrotus franciscanus* and *Lytechinus anamesus*) on recruitment and survival of two species of kelp (*Macrocystis pyrifera* and *Pterygophora californica*). Mar. Biol., 78, 301-313.
- 電力中央研究所(1993). 藻場影響調査総合報告 書-海中林-(昭和62年度~平成4年度総合 とりまとめ). 281pp.
- 道津光生・城戸勝利・伊藤康男(1992). 福島県 沿岸砂浜海域のマクロベントスの分布と生息 環境. 日水誌, 58, 1411-1418.
- 道津光生・野村浩貴・太田雅隆(2002a). 海岸構 造物による岩礁域生物の生息場の造成. 沿岸 海洋研究, **39**, 125-134.
- 道津光生・野村浩貴・太田雅隆・岩倉祐二(1998). 北海道南西部の磯焼け海域に形成されるホソ メコンブ群落(予報).海生研報告, No.9810 1, 16pp.
- 道津光生・野村浩貴・太田雅隆・岩倉祐二(1999). 北海道南西部沿岸の磯焼け海域におけるホソ メコンブ群落の形成要因について.日水誌, **65**, 216-222.
- Dotsu, K., H. Nomura, M. Ohta and M. Kashiwagi (2004). A comparison of the growth of the sea

urchin *Strongylocentrotus nudus* in two habitats, a kelp bed and its adjacent coralline flat. *Suisan Zoshoku*, **52**, 215-219.

- 道津光生・太田雅隆・斉藤二郎(1996). 海岸構 造物における生物的検討-1 発電所海岸構造 物における岩礁性動植物の生息場効果とその 活用.沿岸海洋研究, 33, 123-131.
- 道津光生・太田雅隆・益原寛文(2002b). 長崎県 松島周辺の海藻植生に及ぼすガンガゼ類の食 圧の影響について. 海生研報告, No.4, 1-10.
- 道津光生・太田雅隆・斉藤二郎・山下和則(1997). 海岸構造物上におけるキタムラサキウニの分 布密度と波浪との関係.水産増殖,45,445-450.
- 道津光生・佐々木晴敏(2005). 電気牧柵藻礁に おけるキタムラサキウニの行動に関する基礎 実験. 海生研報告, No.8, 1-10.
- Fuji, A. (1960). Studies on the biology of the sea urchin. III. Reproductive cycle of two sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* and *S.intermedius* in southern Hokkaido. *Bull. Fac. Fish., Hokkaido Univ.*, **11**, 49-57.
- Fuji, A. (1967). Ecologycal studies on the growth and food consumption of Japanese common littoral sea urchin, Strongylocentrotus intermedius (A.Agassiz). Mem.Fac. Fish. Hokkaido Univ., 15, 83-160.
- 富士 昭(1969). 北海道のウニとその増殖. 水
 産増殖叢書, 21, 水産資源保護協会, 石崎書
 店, 東京, 79pp.
- 富士 昭(1973).ウニ類の増殖に関する知見.青森県,84pp.
- Fuji, A. and Kawamura, K. (1970). Studies on the biology of the sea urchin VI, Habitat structure and regional distribution of *Strongylocentrotus intermedius* on a rocky shore of southern Hokkaido. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 36, 755-762.
- 藤田大介(1987). 北海道大成町の磯焼けに関す る聴取り調査. 水産増殖, **35**, 135-138.
- 藤田大介(1989). 北海道大成町の磯焼け地帯の 海藻の分布. 南紀生物, **31**, 109-114.
- 船野 隆(1983).ホソメコンブの生態,第1報 生活史と核相交番,および配偶体と幼胚体 の生理生態.北水試報, No.25, 61-109.
- 船野 隆・石川政雄(1965). 虻田沿岸の古いコ

ンクリート・ブロック礁.北水試月報, 22, 29-37.

- 船野 隆・石川政雄(1967). 伊達市北黄金沿岸 のコンクリートブロック礁,コンブ着生基物 としての耐用年数について.北水試月報,24, 2-9.
- 長谷川 寛(1993).水産増殖への利用も考慮した潜堤付き防波堤の水理特性.電中研報告, U93027,70pp.
- Hasegawa, H., Kawasaki, Y. and Terawaki, T. (1995). Study on new method for kelp foundation creation. Ecoset' 95, Vol.2, 481-486.
- 石川雄介・川崎保夫・本多正樹・丸山康樹・五十 嵐由雄(1988).電源立地点の藻場造成技術 の開発-第9報,水中の光条件に基づくアマ モ場造成限界深度の推定手法.電中研報告, U88010, iii+20pp.
- 伊藤敏晃・高木 カ・平石智徳・鈴木健吾・山本 勝太郎・梨本勝昭(1995).ウニの付着基質 の違いによる移動特性および水平・鉛直壁面 に対する行動能力.水産工学,32,39-43.
- Jensen, M. L. (1969). Age determination of echinoids. *Sarcia*, **37**, 41-44.
- 環境省(2001). 自然環境のアセスメント技術 (Ⅲ) 生態系・自然とのふれあい分野の環 境保全措置・評価・事後調査の進め方.環境 省環境影響評価技術検討会報告書,財務省印 刷局,東京,415pp.
- 川井唯史・桑原久実・金田友紀(2000). ウニフェ ンスを用いた実証試験. 平成11年度北海道立 水産試験場事業報告書, 220-225.
- 川井浩史・丸伊 満・黒木宗尚(1982). 半球形 石膏による海水流動度合の比較. 藻類, **30**, 161-162.
- 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, **31**, 103-110.
- 川俣 茂・足立久美子・山本正明(1994). キタ ムラサキウニに及ぼす波浪の影響. 平成6年 度日本水産工学会学術講演会講演論文集, 85-88.
- 川村一広(1960). サロマ湖と網走のウニについて. 北水試月報, 17, 8-18.
- 川村一広 (1973). エゾバフンウニの漁業生物学 的研究. 北水試報, No.16, 1-54.
- 川嶋昭二 (1991). 日本産コンブ類の分類と分布 [30]コンブ科-コンブ属(9) -ホソメコンブ.

海洋と生物, 74, 206-209.

- 川嶋昭二・佐々木茂(1970). コンクリートブロッ クによるコンブ礁造成調査(砂利または岩盤 地帯に適するブロックの形状試験調査・浜中 地先).昭和44年度漁場改良造成事業大型魚 礁設置事業効果調査報告書,北海道,67-89.
- 川嶋昭二・佐々木茂(1973). コンクリート・ブ ロックへのコンブ着生様式 第1報,円筒型 ブロックの場合. 北水試月報, 30, 15-26.
- Kitching, j. A. and Ebling, F. J. (1961). The ecology of Lough Ine XI. The control of algae by *Paracentrotus Lividus* (Echinoidea). J.Anim. Ecol., **30**, 373-383.
- 菊地省吾(1978).海中造林とその理論.増殖技術の基礎と理論,恒星社厚生閣,東京,68-7
 8.
- 桐山隆哉・藤井明彦・吉村 拓・清水節夫・四井 敏雄(1999). 長崎県下で1998年秋に発生し たアラメ類の葉状部欠損現象.水産増殖, 47, 319-323.
- 熊田 誠・佐々木晴敏(1988). コーラルプロセス(電着)の陽極反応利用.電気化学協会 海生生物汚損対策懇談会主催,無公害生物付 着防止対策の最新の進歩セミナー予稿集,78-84.
- 正置富太郎,秋岡英承(1980). 北海道における 磯焼けの現状について.育てる漁業研究会, 北海道漁業振興公社,4-19.
- マリノフォーラム21 (1992). 平成3年度岩礁地 帯の機能回復技術の研究に関する報告書. 401pp.
- 中村義輝(1960). コンクリート・ブロックの投 石効果調査報告書. 昭和34年度浅海増殖事業 報告書, 北海道, 7-28.
- 中山恭彦・新井章吾(1999). 南伊豆・中木にお ける藻食魚類3種によるカジメの採食. 藻類, 47, 105-112.
- 名畑新一・阿部英治・垣内政宏(1992). 北海道 南西部大成町の磯焼け. 北水試研報, 38, 1-14.
- Neushul, M. (1972). Functional interpretation of benthic marine algal morphology. In "Contribution to the systematics of benthic marine algae of the northern Pacific" (eds. Abbott, I. A. and Kurogi, M.), Japanese Society of Phycology, Kobe, pp.47-73.

- 日本水産資源保護協会(1980).新編 水質汚濁 調査指針.恒星社厚生閣,東京, p.242.
- 農林統計協会(1998). 図説 漁業白書. 平成9年 度,農林統計協会,東京,270+68pp.
- 野村浩貴・道津光生・太田稚隆(2006). 北海道南 西域におけるキタムラサキウニの生殖周期. 海生研報告, No.10(印刷中).
- Paine, R. T. and Vadas, R.L. (1969). The effects of grazing by sea urchins, *Strongylocentrotus* spp., on benthic algal populations. *Limnol. Oceanogr.*, 14, 710-719.
- Pearse, J. S. and Hines, A.(1979). Expansion of a central California kelp forest following the mass mortality of sea urchins. *Mar.Biol.*, 51, 83-91.
- 太田雅隆・道津光生・斎藤二郎(1992). 海岸構 造物上におけるウニ類の分布について. 平成 4年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.128.
- 三本菅善昭(1994). 磯焼けの生態. 水産業関係
 試験研究推進会議 資源増殖部会テーマ別の
 レビュー Ser.3, 164pp.
- 資源エネルギー庁(1992). 電気事業審議会需給 部会 電力基本問題検討小委員会報告書, 20pp.
- 清水 博・渡辺耕平・新井章吾・寺脇利信(1999). 日向灘沿岸におけるクロメ場の立地環境条件 について. 宮崎水試研報, No.7, 29-41.
- 水産土木研究部会(1976). 各種海岸構造物にお ける水産生物蝟集の事例に関するアンケート 調査結果.水産土木, 13, 29-42
- 水産土木建設技術センター(1996). 平成7年度 自然調和漁港づくり委員会報告書. 217pp.
- 水産庁・水産土木建設技術センター(2002).平 成13年度水産基盤整備調査委託事業報告書, 自然調和型漁港構造物の検討調査.248pp.
- 武内智行・宮本義憲・増田 亨(1990). 防波堤 周辺の水産生物生息分布調査-瀬棚港を例と して-.海岸工学論文集, **37**, 828-832.
- 寺脇利信(1988).海中林造成技術の基礎的検討 第2報 カジメ幼体の入植と人工基盤の表面 形状.電中研報告,U88037:26pp.
- 徳田 廣・川嶋昭二・大野正夫・小川久朗 (1991). 海藻の生態と藻礁.緑書房,東京, 198pp.
- 山崎慎太郎・梨本勝昭・山本勝太郎・平石智徳 (1993). エゾバフンウニとキタムラサキウニ

に作用する流体力. 日水誌, **59**, 1139-1146.

- 谷野賢二・明田定満・佐藤 仁・松山恵二・吾妻 行雄・中多章文(1994). ウニの摂餌活動に およぼす物理環境要因について. テクノオー シャン94国際シンポジウム論文集, 1, 195-198.
- 谷野賢二・明田定満・佐藤 仁・大森康弘・富士 昭(1993).防波堤の擬似岩礁効果について. 海岸工学論文集,40,1151-1155.
- 四井敏雄・前迫信彦 (1993). 対馬東岸の磯焼け 帯における藻場回復実験.水産増殖, **41**, 67-70.
- 運輸省港湾局(監修)(1998).港湾構造物と海藻 草類の共生マニュアル.港湾空間高度化セン ター,東京,101pp.
- 增殖場造成指針作成委員会(1982). 增殖場造成 指針,昭和58年度版. 全国沿岸漁業振興開発 協会,地球社,東京,252pp.