

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

道津光生^{*1}・佐々木晴敏^{*2}

Basic experiments of the behavior of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*
on the model of the artificial reef equipped with the electric fence.

Kosei Dotsu^{*1}, Harutoshi, Sasaki^{*2}

要約：本研究に先立って北海道泊海域において実施した電気牧柵を用いたホソメコンブ群落の造成実験により、電極で囲った実験藻礁の内側から外側へのキタムラサキ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、その結果、藻礁内側には、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、コンブ群落を人工的に造成することができた。本研究においては、これらの結果をもとに、電極を装備した小型の実験藻礁の模型を作製し、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。牧柵内へのはいあがり試験では、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、数時間の間に牧柵内への侵入が見られたが、通電した場合には、2週間の間、完全に侵入を防止することができることを確認した。また、脱出試験の結果では、ウニは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、“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。

キーワード：電気牧柵，磯焼け，キタムラサキウニ

Abstract : Previously we made an experimental artificial reef to propagate a kelp bed along the coastal area of Tomari village, Hokkaido, to protect from overgrazing by sea urchin with using an electric fence. Doing so, we found that the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* migrated from inside to the 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. From the results of the previous study, we made a small experimental reef model equipped with an electric fence and observed the sea urchins' behaviors in our laboratory. We studied the effectiveness of the defense mechanism against the invasion of 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 non-energizing conditions, 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. 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 and soon fell to the bottom under their own weight. The average time from release to falling down was 98 seconds. 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.

Keywords : electric fence, coralline flat, sea urchin, *Strongylocentrotus nudus*.

(2004年11月18日受付, 2004年12月13日受理)

*1 財団法人 海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0013 新潟県柏崎市荒浜4-7-17)

E-mail : dotsu@kaiseiken.or.jp

*2 三井造船鉄構工事株式会社 (〒261-7112 千葉市美浜区中瀬2-6)

はじめに

発電所や漁港などの防波堤や護岸は、様々な底生生物の生息場となっていることが知られるようになり（水産土木研究部会，1976），これらの海岸構造物が海域環境の改善に役立つ可能性について検討されるようになってきた。海洋生物環境研究所では，海域環境に調和した発電所の実現にむけて，発電所港湾等の海岸構造物を本来の港湾としての目的のみではなく，水産生物の生息場として活用するための方法について検討してきた（道津ら，1996）。

一方，著者らが一連の事業のモデル海域として選定した北海道南西部沿岸は，無節サンゴモ類が卓越したサンゴモ平原（Ayling, 1981），いわゆる磯焼け海域となっており，多数分布する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，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）。

しかし，磯焼けが顕著な北海道南西部沿岸海域においても，部分的に一年生のコンブであるホソメコンブが繁茂し，生殖腺の豊かなウニが生息している場所が存在する（道津ら，1998）。著者らは，このようなホソメコンブ繁茂域では，波浪と海底地形により，ウニの行動が季節的に抑制され，芽生えはじめたコンブに対するウニの摂餌圧が制御されることによって，コンブ群落形成されることを明らかにした（道津ら，1999）。さらに，これらの結果をもとに，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（道津ら，2002）。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，藻礁内側には，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（道津ら，2002）。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，著者らは，電極を装備した小型の実験藻礁

の模型を作成し，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。

電気牧柵技術の概要

電気牧柵は，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 HClO^- ）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



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（ Cl_2 ）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。この酸性皮膜の厚さは陽極表面から約 $100\mu\text{m}$ と薄く，海水中に拡散希釈されて再び元の塩素イオンの（ Cl^- ）に戻る。陽極表面における酸性物質の皮膜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）により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 $0.1\text{A}/\text{m}^2$ ，アワビ類，ウニ類，ヒトデ類等の大型動物については $0.1\sim 0.5\text{A}/\text{m}^2$ 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 $0.1\sim 3.0\text{A}/\text{m}^2$ 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を最小限に抑えるような工夫が必要となる。

材料と方法

実験装置の概要 実験装置の仕様をTable 1に、施設の概要をFig. 1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、金網と水槽底面との約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。

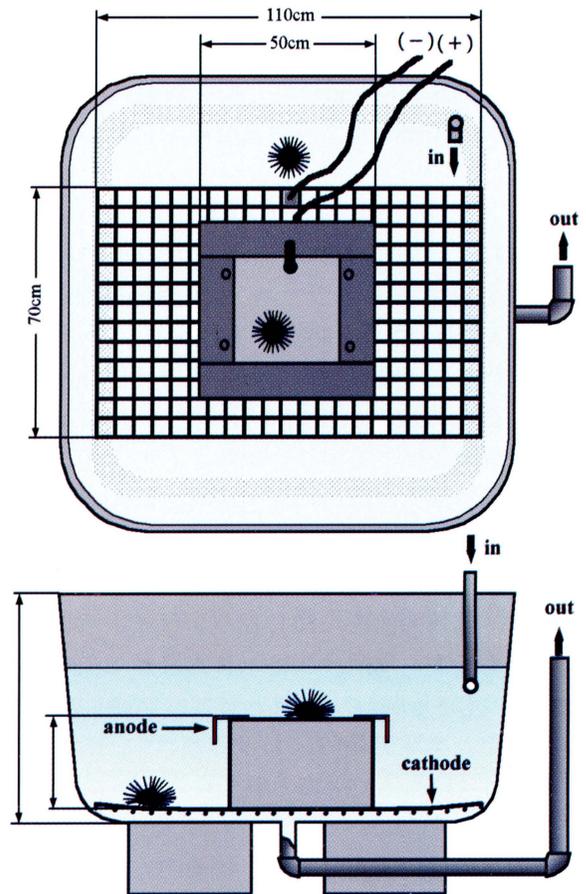


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

直流電源装置によって、0~1Aの範囲の任意の値に電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。

Tabl 1. The specifications of the experimental model of the artificial reef which equipped electricfence

Anode	Material	Dimensionally Stable Electrode
	Form	L-shaped
	Dimension	100mmW × 75mmH × 500mmL
	Electrode area	75mmH × 2000mmL × 2 (Table and reverse side)=3000cm ²
	Method to fix to the base	Fixed with 4 pair of PVC volt and nat to the PVC base
Base (mound)	Material	PVC
	Form	Box shaped
	Dimension	400mmW × 400mmL × 250mmH
Cathod	Material	Welding wire netting (φ 6mm, 50mm mesh)
	Dimention	700mmW × 1100mmL
Power supply	Standard	Direct current device (AC100V/DC 0~10V, 1A)
	Control method	Fixed electric current (available to be set up in the optional range of 0 - 10V)

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。

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 *Strongylocentrotus nudus* (以下、ウニと略記) 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°C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°C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容パンライト水槽で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個体の平均と偏差)であった。

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。「非通電時のはいあがり試験」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、「通電時のはいあがり試験」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。

周囲への脱出試験 野外実験(道津ら, 2002)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。

結果

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. 2に、試験終了時の結果をFig. 3に示した。試験期間中の水温は17.9-18.4°C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. 2a)、2時間目には2個体が壁面を登り始め(Fig. 2b)、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. 2c)。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(Fig. 2d-2h)、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. 2i)。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。

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. 4, 5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をかじり取る個体がみられ、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. 5b)。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. 4d, 5c)。

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. 4a-4g)。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. 4h, 5e)。

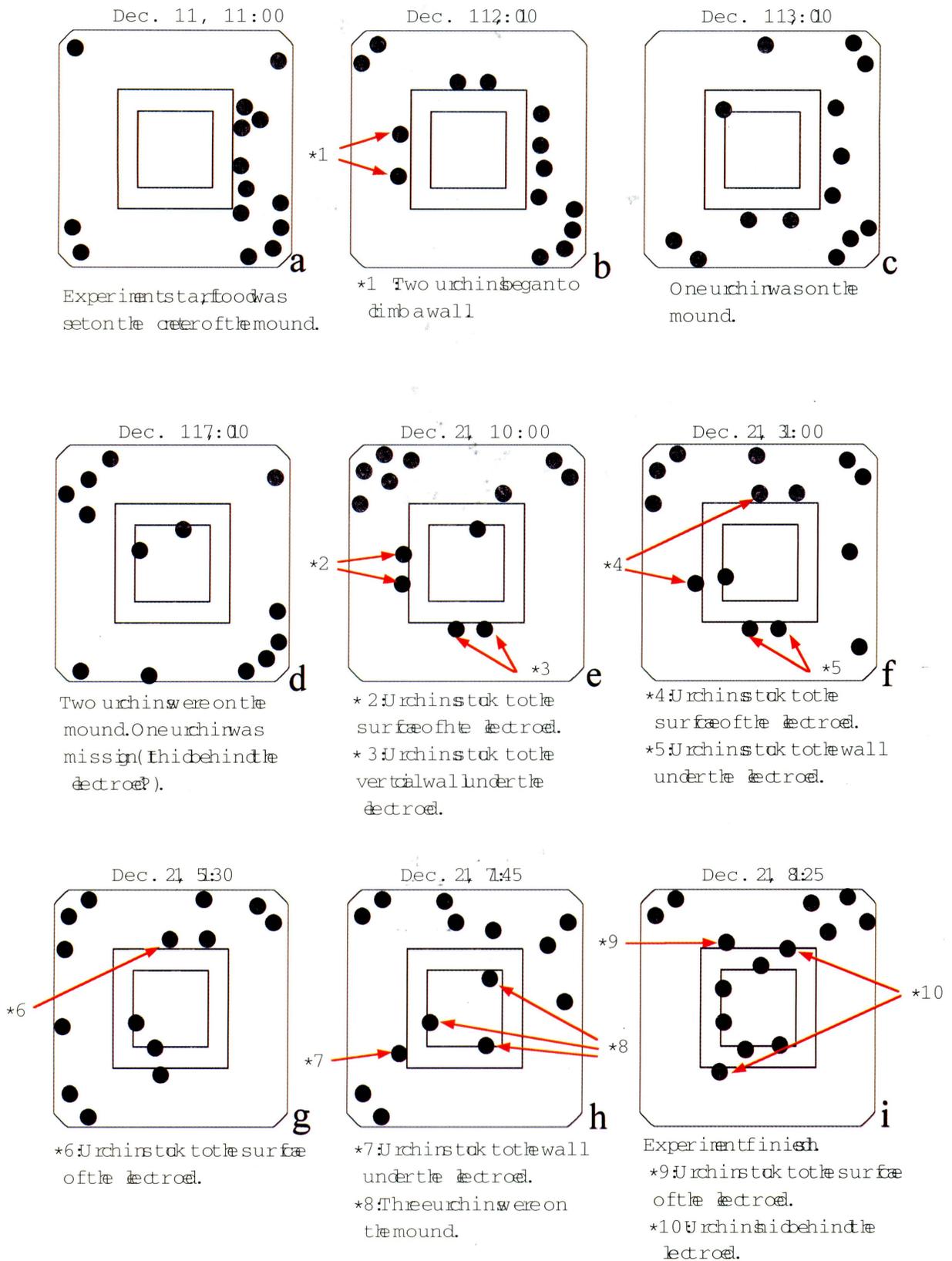


Fig. 2. Distribution of the sea urchin in the invading experiment by non-energizing.



Fig. 3. Result of the invading experiment by non-energizing (32 hours after).

周囲への脱出試験 試験結果をTable 2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秒目に、もう1個体は34秒目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

Table 2 Results of escape experiments

Date	Time	Individual number	Time to reach the edge (sec.)	Time to fall down (sec.)	Note	Temperature (°C)
Dec.27,2001	14:00	1-1	29	33	Two urchins were released at the same time.	13.9
		1-2	29	34		
		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	Urchin was remaining in the center of the mound for nineteen hours.	13.9
		*2-2	-	-		
Jan.10, 2002	11:00	3-1	24	31	Excluding the case of *mark trials	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		
		Min	22	26		
		Average	40	98		
S.D.	16	66				

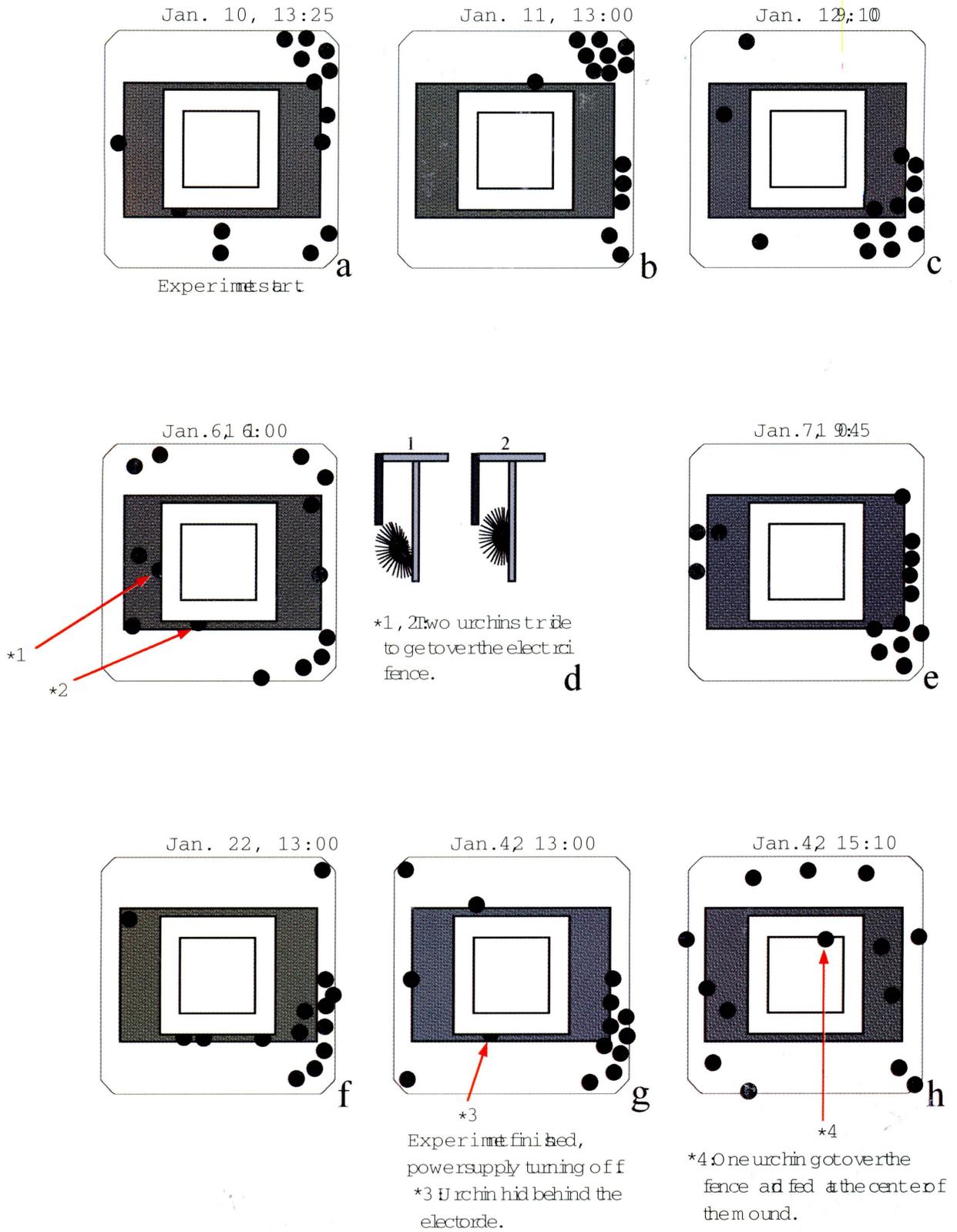


Fig. 4. Distribution of the sea urchin in the invading experiment by energizing.

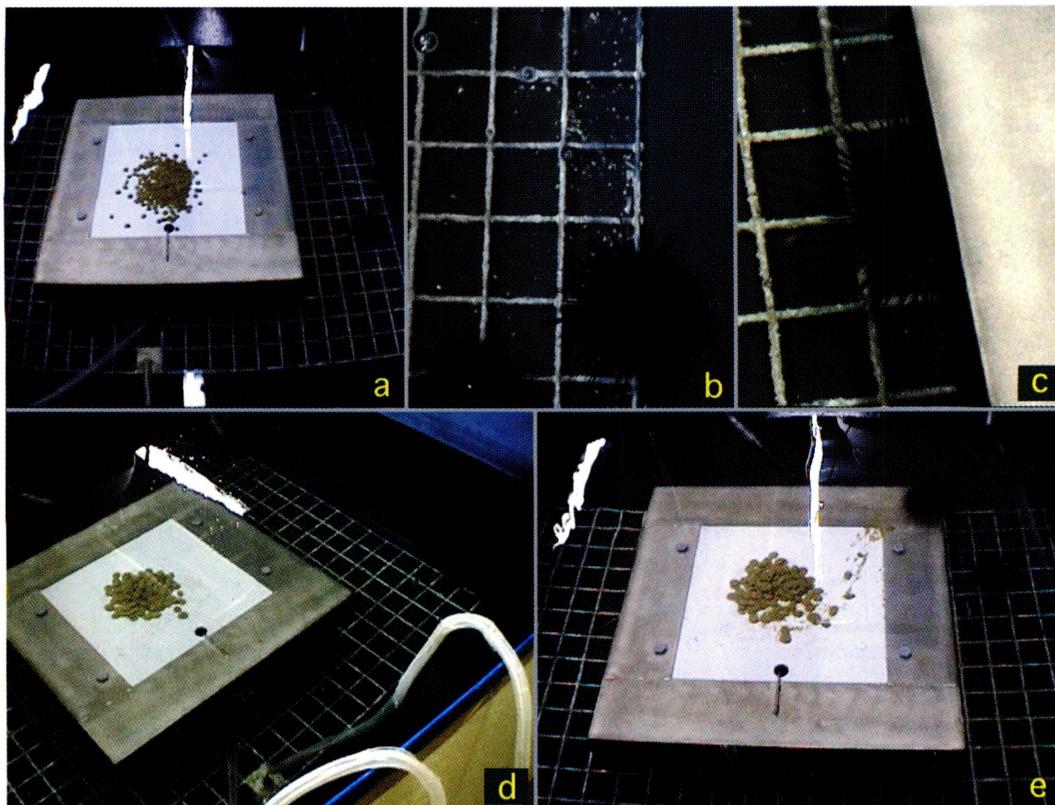


Fig. 5. Result of invading experiment by energizing.
 a : Experiment start, 50g of food was placed at the center of the mound. b : Five days after, urchin grazed CaCO_3 generated from cathode. White excrements were scattered. c : Six days after, an urchin which tried to get over the electric fence. d : Fourteen days after, experiment finished with electricity turning off. e : Fourteen days after, one urchin got over the electric fence and fed on the mound.

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

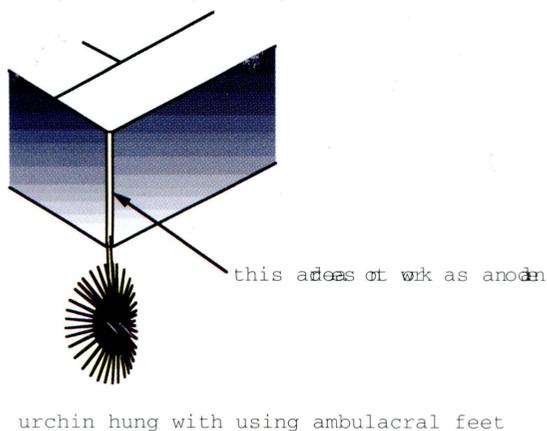


Fig. 6. State of the urchin just before falling down in the case of 1-4.

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の結果をのぞく)。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秒目には、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

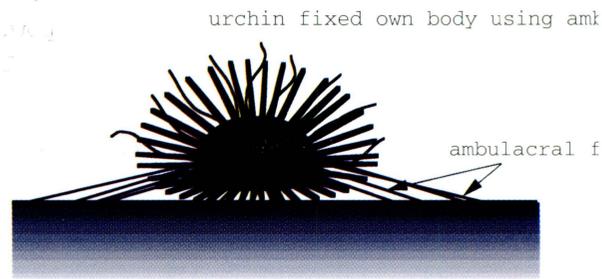


Fig. 7. State of the urchin in the case of 2-2.

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 (Fig. 6)。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 (Fig. 7)。それ以降、19時間の間そのままの状態ですべて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。

考 察

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、2002）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（道津ら、2002）では、 $2.4\text{A}/\text{m}^2$ の電流密度条件下で実験を行ったが（電流 9.5A 、電極表面積 4m^2 、海洋生物環境研究所、2000）今回は、さらに弱い $0.67\text{A}/\text{m}^2$ 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ってゆく必要があると考えられる。

引用文献

- 吾妻行雄・松山恵二・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.
- Ayling, A. M. (1981). The role of biological disturbance in temperate subtidal encrusting communities. *Ecology*, **62**, 830-847.
- 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・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. 98101, 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.
- 道津光生・野村浩貴・太田雅隆（2002）. 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.
- 水産土木研究部会（1976）. 各種海岸構造物における水産生物増集の事例に関するアンケート調査結果. 水産土木, **13**, 29-42
- 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.
- 海洋生物環境研究所（2000）. 平成11年度海域環

境調和発電所実証調査報告書 構造物による
岩礁域生物増殖効果調査（最終とりまとめ）.
351pp.

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, pp. 220-225.

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行集,
pp. 78-84.

名畑進一・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.