

石油精製副産物である硫黄を活用した水産増殖 資材（レコサル藻礁）についての評価

EVALUATION OF NEW SEAWEED BED "RECOSUL" MADE FROM OIL
REFINERY BY PRODUCT

村上 俊哉¹・武田 史絵²・太田 義高³・櫻井 泉⁴・山本 潤⁵・山下 成治⁶
Toshiya MURAKAMI, Shie TAKEDA, Yoshitaka OOTA, Izumi SAKURAI,
Jun YAMAMOTO and Nariharu YAMASHITA

¹正会員 株式会社 エコニクス 営業企画部（〒004-0015 札幌市厚別区下野幌テクノパーク1-2-14）
（前株式会社 エコニクス 環境事業部）

²株式会社 エコニクス 環境事業部（〒004-0015 札幌市厚別区下野幌テクノパーク1-2-14）

³新日本石油 株式会社 研究開発本部開発部 硫黄利用PJG（〒050-0065 室蘭市本輪西町1-8）

⁴水博 北海道立中央水産試験場 水産工学室（〒046-8555 北海道余市郡余市町浜中町238）

⁵正会員 工博 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34）

⁶水博 北海道大学院 水産科学研究科 環境生物資源科学専攻（〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1）

A new seaweed bed called 'Recosul', composed of modified-sulfur and recycled inorganic materials, is examined in immigration and growth of seaweed (*Laminaria angustata*).

Comparison to conventional concrete seaweed bed shows significant difference in several cases with minute measurements on shape of *Laminaria angustata* but in the number of immigrated individuals.

Recosul is known as not only salt and acid resistance but also abrasion resistance and stability when added high density steel slag.

Recosul is suitable for artificial reef material.

Key Words : "Recosul" (Recycle・Ecology・Sulfur), circulation, seaweed bed,
Laminaria angustata, examine

1. はじめに

我が国の豊かな自然環境を後世に引き継ぐとともに、産業活動が将来にわたり持続的に発展するためには、循環型社会の実現に向けた取り組みが必要となっている。

循環資源については、循環型社会形成推進基本法において「廃棄物等のうち有用なもの」と定義される。このうち、無機性循環資源には、火力発電所で発生する石炭灰や、製鉄所で発生する鉄鋼スラグなど、既にセメント原料などとして建設工事などに有効利用が進められているものもあるが、循環型社会の構築に向けて更なる有効利用を促進するには、土木資材に留まらず、水産業における水産増殖事業等への有効利用が期待されるところである。

石油精製時の副産物である硫黄は、国内の石油会社から石油製品の副産物として年間約 200 万トン生産されており、その内、約 120 万トンは海外へ輸出

されているが国内では需要が飽和状態となっている。

一方、地域産業の副産物として発生するホタテ貝殻は、北海道では年間約 20 万トン発生しており、藻礁・魚礁や増殖場の造成など、同一産業分野として、水産業での利用および検討が進められている。

こうした中、地域の発展と新しい産業の創出を目指し、新素材である「レコサル」が開発された¹⁾。この「レコサル」は、硫黄に添加剤を加えた「改質硫黄」をバインダーとして石などの骨材と一緒に固化させたものである。成型性に優れていることから、スラグ、ホタテ、石炭灰などを骨材として有効活用することが可能であり、高強度で遮水性に優れ、耐海水性・耐磨耗性が高いという特性を有し、普通コンクリートの 1.2 倍程度の生産コストで製造が可能であることから、循環型資材として、藻礁・魚礁などへの利用が期待されている。

以上のような背景から、本研究では、改質硫黄と

無機性循環資源を含有しているレコサール藻礁の水産増殖資材としての有効性について検討した。

2. 調査域と方法

(1) 試験礁の概要

試験礁は、アルガロック（表-1）と、上面部に脱着式のプレートが9枚取り付けられた構造のホロースケヤーベース（表-2）の2タイプの形状のものを用了。

試験礁の材質は、コンクリート、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ、ホタテ透過性の5種類であり、各々の試験礁における素材の配合割合は、改質硫黄が約2割、石炭灰が約1割で、コンクリート、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ貝殻のうちいずれか1種類の素材が約7割を占める構成である。なお、ホタテ貝殻については、約22%の空隙をもたせた試験礁（ホタテ透過性）も用了。

表-1 試験礁の形状（アルガロック）

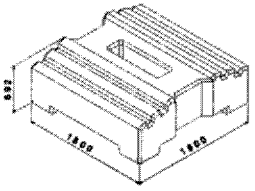
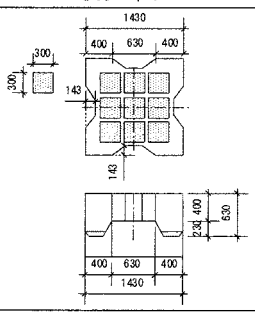
名 称	アルガロック
タイプ	3tタイプ
形 状	
サイズ	1.8×1.8×0.7m
材 質	コンクリート、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ、ホタテ透過性

表-2 試験礁の形状（ホロースケヤーベース）

名 称	ホロースケヤーベース（基質脱着型）
タイプ	3tタイプ
形 状	
サイズ	台座：1.5×1.5×0.6m 基質：0.3×0.3m
材 質	台座：コンクリート、製鋼スラグ 基質：コンクリート、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ、ホタテ透過性

(2) 試験礁の設置

2005年11月16日、図-1に示す北海道登別市の蘭法華岬前面海域（水深3.0～4.5m）に、アルガロック24基、ホロースケヤーベース9基の計33基

をコンクリート、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ、ホタテ透過性といった材質毎に、ラテン方格法で決定した配列で敷設した（図-2、表-3～4）。

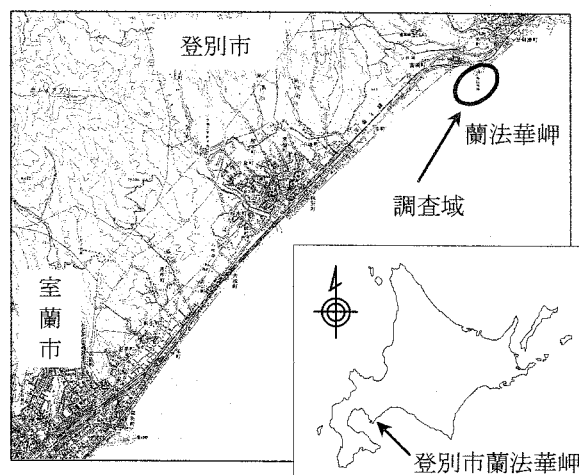


図-1 調査域（北海道登別市蘭法華岬前面海域）

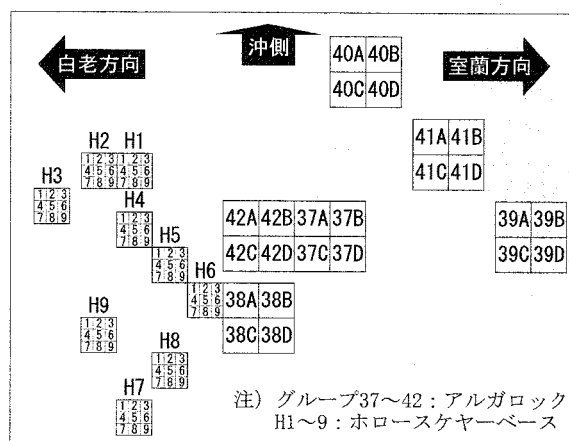


図-2 試験礁の配置

表-3 材質別試験礁一覧（アルガロック）

材 質	試験礁
コンクリート	37A, 38B, 39D, 40A, 41B, 42D
製鋼スラグ	38D, 39C, 40B, 42C
電炉スラグ	37B, 41D
ホタテ	37C, 38A, 39A, 40C, 41A, 42A
ホタテ透過性	37D, 38C, 39B, 40D, 41C, 42B

表-4 材質別試験礁一覧（ホロースケヤーベース）

材 質	試験礁
コンクリート	H1-6, H2-9, H3-5, H4-4, H5-8, H6-3, H7-2, H8-7, H9-1
製鋼スラグ	H1-4, H1-8, H2-3, H2-5, H3-6, H3-7, H4-2, H4-5, H5-1, H5-2, H6-1, H6-6, H7-7, H7-9, H8-3, H8-8, H9-4, H9-9
電炉スラグ	H1-1, H1-2, H2-6, H2-7, H3-3, H3-8, H4-7, H4-9, H5-4, H5-9, H6-4, H6-8, H7-3, H7-5, H8-1, H8-6, H9-2, H9-5
ホタテ	H1-3, H1-5, H2-1, H2-2, H3-4, H3-9, H4-1, H4-6, H5-6, H5-7, H6-7, H6-9, H7-4, H7-8, H8-2, H8-5, H9-3, H9-8
ホタテ透過性	H1-7, H1-9, H2-4, H2-8, H3-1, H3-2, H4-3, H4-8, H5-3, H5-5, H6-2, H6-5, H7-1, H7-6, H8-4, H8-9, H9-6, H9-7

(3) 設置後の追跡調査

2006年4月および11月に、ダイバー潜水によって試験礁上に着生した海藻類の定量採取または目視観察を行った。

2006年4月の調査では、アルガロック全24基（コンクリート6箇所、製鋼スラグ4箇所、電炉スラグ2箇所、ホタテ6箇所、ホタテ透過性6箇所）を対象として定量採取を行い、ホロースケヤーベースについては、基質27箇所（コンクリート3箇所、製鋼スラグ6箇所、電炉スラグ6箇所、ホタテ6箇所、ホタテ透過性6箇所）を対象として目視観察を行った。

2006年11月の調査では、アルガロック13基（コンクリート4箇所、製鋼スラグ2箇所、電炉スラグ1箇所、ホタテ3箇所、ホタテ透過性3箇所）とホロースケヤーベース基質13箇所（コンクリート3箇所、製鋼スラグ3箇所、電炉スラグ3箇所、ホタテ3箇所、ホタテ透過性1箇所）を対象として定量採取を行った。

アルガロックサンプリング箇所を図-3に示す。

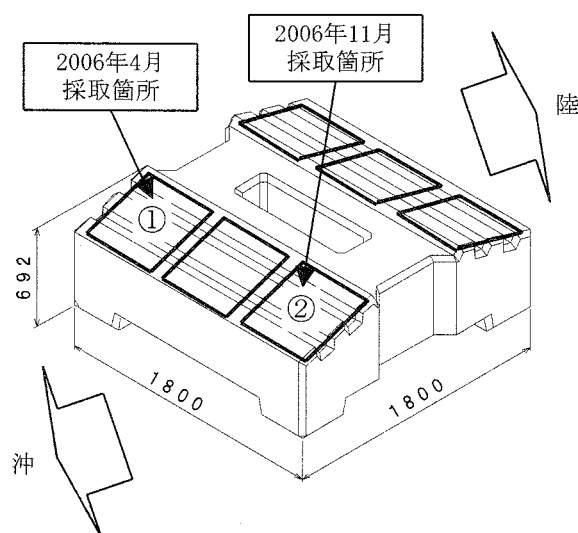


図-3 アルガロックサンプリング箇所

3. 結果

(1) 材質別の着生量

追跡調査の結果、2006年4月にはエゾヒトエグサ、ウスバアオノリ、イギスなどが出現し、主要なコンブ科植物としては、ミツイシコンブ、チガイソ、スジメが見られていた（表-5）。

しかし、2006年11月にはミツイシコンブ、チガイソのみの出現となっており（表-6）、小型海藻類の着生は観察されず、ミツイシコンブが湿重量全体の9割以上を占めていた（図-4～5、写真-1～2）。

材質の違いによるミツイシコンブの着生量（湿重量または葉体被度、着生本数）を比較したところ（図-6～7）、アルガロックおよびホロースケヤー

ベースともに材質間で有意な差はみられず（Kruskal-Wallis test, $p>0.05$ ）、レコサル藻礁における着生量はコンクリート材質と比較して異なることはないことが確認できた。

表-5 出現種一覧（2006年4月）

アルガロック	ホロースケヤーベース
緑藻綱：チガイソ スジメ ミツイシコンブ	緑藻綱：エゾヒトエグサ ウスバアオノリ 褐藻綱：チガイソ ミツイシコンブ 紅藻綱：フタツガサネ イギス キブリイトグサ

表-6 出現種一覧（2006年11月）

アルガロック	ホロースケヤーベース
褐藻綱：チガイソ ミツイシコンブ	褐藻綱：チガイソ ミツイシコンブ

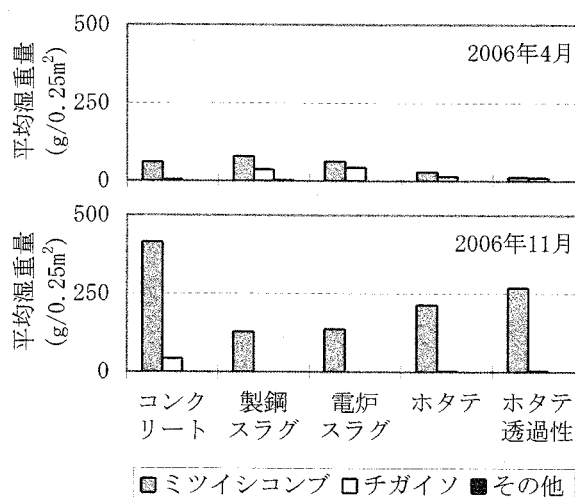


図-4 材質別海藻類出現状況（アルガロック）

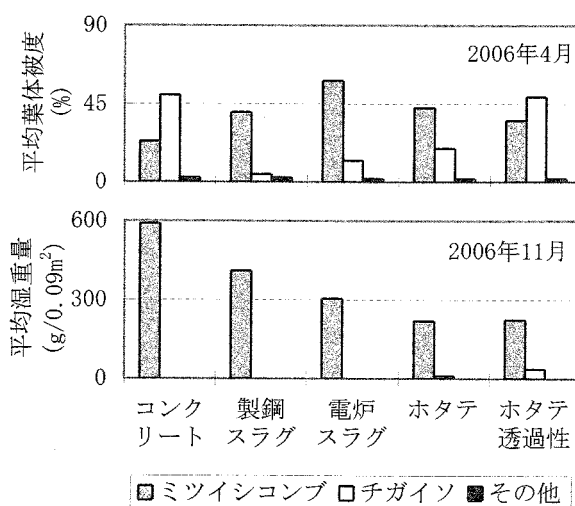


図-5 材質別海藻類出現状況（ホロースケヤーベース）

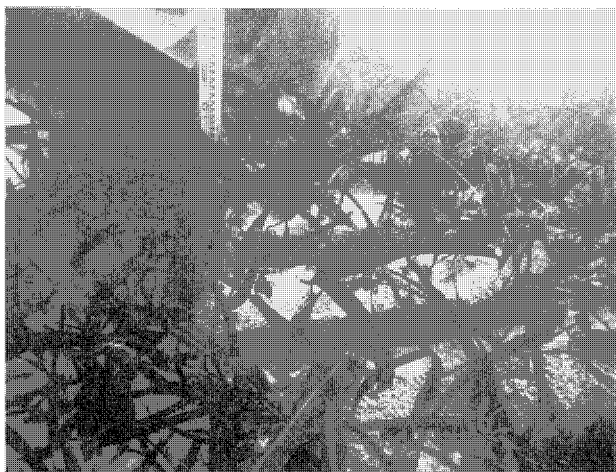


写真-1 海藻類着生状況 (2006年11月, アルガロック 38A 全体)

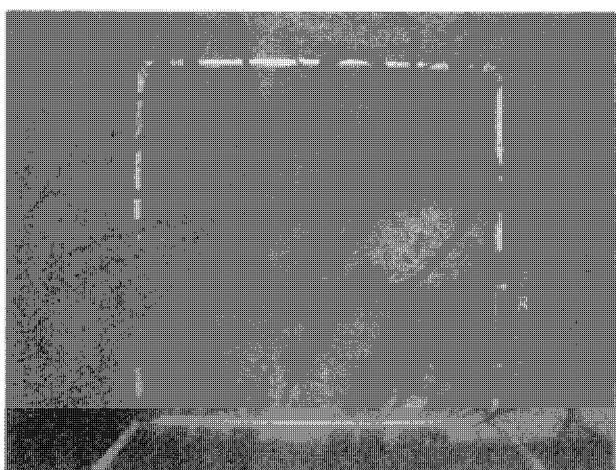


写真-2 海藻類着生状況 (2006年11月, アルガロック 38A の②)

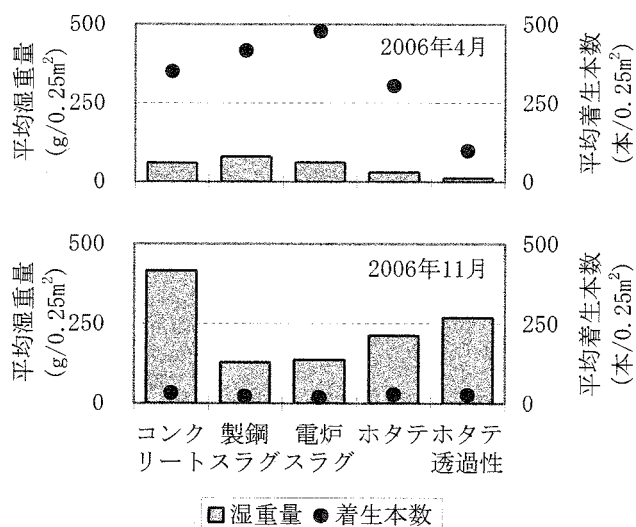


図-6 材質別ミツイシコンブ出現状況 (アルガロック)

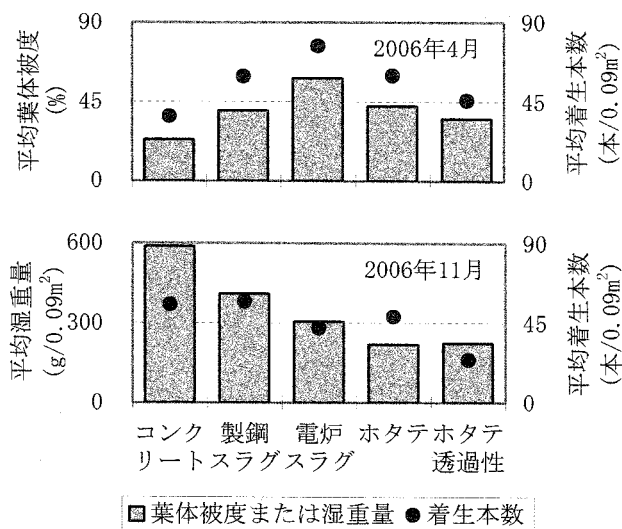


図-7 材質別ミツイシコンブ出現状況 (ホロースケヤーベース)

(2) ミツイシコンブの材質別サイズ組成

ミツイシコンブの形態については、個体別に測定した葉長、葉幅、湿重量と、葉長、葉幅、湿重量から求めた肥大度で比較を行った。

初期加入時期である2006年4月のアルガロックでは(図-8)、コンクリート材質よりもホタテ殻材質とホタテ透過性材質のほうが葉長、湿重量、肥大度が小さかった(Steel-Dwass test, $p \leq 0.001$)。末枯れ時期である2006年11月のアルガロックでは(図-9)、製鋼スラグ材質での葉長が他の材質よりも小さく(Steel-Dwass test, $p \leq 0.05$)、肥大度ではコンクリート材質およびホタテ材質よりも製鋼スラグ材質のほうが大きかった(Steel-Dwass test, $p \leq 0.05$)。

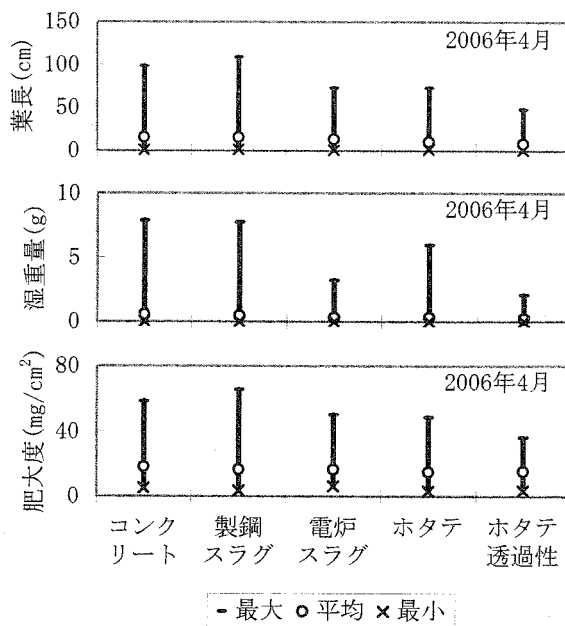


図-8 材質別ミツイシコンブ計測結果 (アルガロック, 2006年4月)

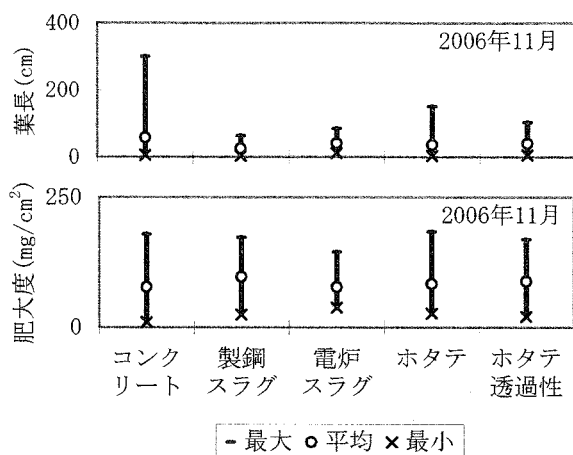


図-9 材質別ミツイシコンブ計測結果（アルガロック，2006年11月）

他方，ホロースケヤーベースでは（図-10，表-7），電炉スラグ材質およびホタテ材質の葉長，葉幅，湿重量，肥大度がコンクリート，製鋼スラグよりも小さく（Steel-Dwass test, $p \leq 0.05$ ），ホタテ透過性材質の肥大度は，製鋼スラグや電炉スラグよりも大きかった（Steel-Dwass test, $p \leq 0.01$ ）。

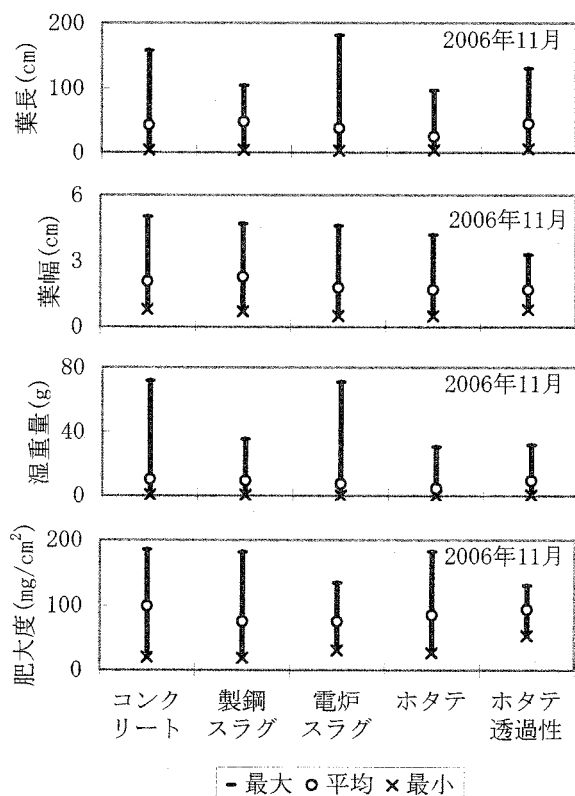


図-10 材質別ミツイシコンブの肥大度（ホロースケヤーベース，2006年11月）

表-7 ホロースケヤーベース材質別ミツイシコンブ肥大度 Steel-Dwass 統計量

	コンクリート	製鋼スラグ	電炉スラグ	ホタテ	ホタテ透過性
コンクリート		5.849***	5.733***	3.384**	0.675
製鋼スラグ			-0.667	-2.435	-3.575**
電炉スラグ				-1.917	-3.543**
ホタテ					-1.861
ホタテ透過性					

注) ***：有意水準 0.1%，**：有意水準 1%で有意差があることを示す。

4. 考察

試験礁（レコサル藻礁）に着生したミツイシコンブについての細部計測の結果では，幾つかのケースで有意差は認められたものの，総じて着生量については 5 種類の材質間での有意差は認められなかった。

追跡調査の際，試験礁上ではコシダカガンガラ，ユキノカサガイなど小型の動物は僅かに観察されたが，ウニなどの大型藻食動物の生息は確認できなかった。

キタムラサキウニの摂食限界環境については，最大流速 u_{max} が 0.25m/s を超えると摂食速度は急激に低下し，0.40m/s 以上ではほとんどゼロになることが実験で明らかにされている²⁾。このキタムラサキウニの摂食速度と流速との関係は，日間摂食量を F ，静水中での F の値を F_s とすると，次の式で表すことができる。

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

この関係式に，本研究での試験礁設置箇所の水深 3.0～4.5m および試験礁の高さ 0.6～0.7m を当てはめ，キタムラサキウニの摂食限界環境について検証したところ，波高で 0.37m を超えると，摂食速度の低下が起こるものと推定できた。

水産動植物の増殖場造成に係る魚礁や藻礁といった新規構造物の適格性の判断には，対象構造物の安全性，耐久性，機能性，経済性，実行性の 5 つの評価項目が挙げられる。

改質硫黄固化体「レコサル」は，溶出試験結果より環境側面の安全性が把握されている（表-8）。また，従来のコンクリートに比べ，圧縮強度で 1.5～2.0 倍，引張強度で 2.0～3.0 倍，曲げ強度で 1.5～2.0 倍の高強度を有し，比重も 0.8～1.5 倍と，耐久性，実用性に関しては概ね満足でき，海水中での安定性は高い（表-9）。

表-8 レコサールの環境省告示 46 号溶出試験結果³⁾

	カドミウム (mg/L)	全シアン (mg/L)	鉛 (mg/L)	六価クロム (mg/L)
製鋼スラグ	<0.001	<0.005	<0.005	<0.02
ホタテ貝殻	<0.001	<0.005	<0.005	<0.02
環境基準	≤0.01	不検出	≤0.01	≤0.05
	ヒ素 (mg/L)	総水銀 (μg/L)	アルキル水銀1 (μg/L)	アルキル水銀2 (μg/L)
製鋼スラグ	<0.002	<0.1	<0.5	<0.5
ホタテ貝殻	<0.002	<0.1	<0.5	<0.5
環境基準	≤0.01	≤0.5	不検出	不検出
	PCB (μg/L)	セレン (mg/L)	フッ素 (mg/L)	ほう素 (mg/L)
製鋼スラグ	<0.3	<0.002	0.72	0.5
ホタテ貝殻	<0.3	<0.002	0.08	0.1
環境基準	不検出	≤0.01	≤0.9	≤1

注) 製鋼スラグ系硫黄固化体：鉄鋼スラグ 67wt%+石炭灰 11wt%+改質硫黄 22wt%
ホタテ貝殻系硫黄固化体：ホタテ貝殻 64wt%+石炭灰 12wt%
+改質硫黄 24wt%

レコサール藻礁の実用化へ向けては、他方で低コスト短期間での製造について検討を重ねているところであるが、実海域における海藻類着生の追跡調査は 2007 年 5 月にも計画しており、設置 2 年経過後のコンブ類の着生状況を確認し、更なるデータの蓄積を進めていく方針である。

なお、本研究における試験礁の製造・設置および調査は、新日本石油（株）が（財）石油産業活性化センターの事業として実施した。

表-9 レコサールの基本物性¹⁾

配合比率 (重量%) 等		レコサール 電炉スラグ(77) 石炭灰(8) 改質硫黄(15)	コンクリート 水セメント比： 46%
密度 (g/cm ³)		2.9	2.3
空隙率 (容量%)		-	4.0 (空気量)
強度	圧縮 (N/mm ²)	69.7	35.0
	割列 (N/mm ²)	4.8	3.0
	曲げ (N/mm ²)	11.3	6.0
線膨張係数 (K ⁻¹)		18.0×10 ⁻⁶	10~20×10 ⁻⁶
吸水率 (重量%)		<0.1	9.0
透水性 拡散係数 (cm ² /sec)		0.00×10 ⁻⁵ (浸透なし)	1.33×10 ⁻⁵

謝辞：試験の設置者申請者となつていただいた、いぶり中央漁業協同組合殿をはじめ、設置許可を頂いた北海道室蘭土木現業所殿、敷設工事にご協力頂いた北興工業（株）殿、レコサールの骨材を提供していただいた北海道電力（株）殿、新日本製鐵（株）殿、（株）日本製鋼所殿を始めとする関係諸氏に御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 新日本石油：新日本石油の新素材「レコサール」パンフレット。
- 2) 川俣 茂：磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性、水産工学, Vol. 31, No. 2, pp. 103-110, 1994.
- 3) 北海道循環資源利用促進協議会水産資材部会編：水産増養殖事業における無機性循環資源利用の手引き、北海道, 2005.