

藻場造成用鉄鋼スラグブロックへの海藻着生

ADHESION OF SEAWEED ON STEELMAKING SLAG BLOCKS AS SEAWEED REEF

宮田康人¹・沼田哲始²・高木正人³・高橋達人⁴・小山田久美⁵・小田俊司⁶

Yasuhito MIYATA, Noriji NUMATA, Masato TAKAGI,
Tatsuhito TAKAHASHI, Kumi OYAMADA and Shunji ODA

¹工修 JFEスチール株式会社 (〒721-8510 広島県福山市鋼管町1)

²JFEスチール株式会社 (〒260-0835 千葉県千葉市中央区川崎町1)

³正会員 工博 JFEスチール株式会社 (〒260-0835 千葉県千葉市中央区川崎町1),
(現 財団法人 地球環境産業技術研究機構)

⁴工博 JFEスチール株式会社 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-3)

⁵ Ph. D. JFE技研株式会社 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-1)

⁶JFEホールディングス株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-1-2)

It has been conducted marine environment improvement tests in Innoshima, the Seto Inland Sea, utilizing slag, byproduct of iron and steelmaking processes. The test aims to improve coastal sea area using 100% recycled materials. It was used steelmaking slag block as seaweed reef, granulate blast furnace slag for sand capping, and steelmaking slag in the shape of stone as submerged dike materials. Steelmaking slag block is a large carbonic solid produced by blowing gas containing carbon dioxide (CO₂) into the pulverized steelmaking slag. Results showed that *Sargassum* and other seaweed were covered on the blocks and species of seaweed were increased as time goes on. These suggest that carbonated slag blocks have good potential as seaweed bed and are applicable to the marine environmental improvement projects.

Key Words : iron and steelmaking slag, steelmaking slag block, seaweed reef, *Sargassum*, carbon dioxide

1. 緒言

日本の沿岸域では、藻場・干潟の消失、赤潮・青潮の発生、水産資源の減少などの環境悪化が顕在化している。最近では、自然再生推進法の施行、海の自然再生における包括的取り組み¹⁾など、行政レベルの沿岸環境修復への動きも徐々に活発化しつつある。

これまでに、鉄鋼生産に伴い副生する鉄鋼スラグを用いた藻場造成技術、水質改善技術について、いくつかの研究事例がある。粒状製鋼スラグを成形して強制的に二酸化炭素を吹込み、スラグ中の酸化カルシウムと反応させて炭酸カルシウムを生成させて製造する藻場造成用鉄鋼スラグ炭酸固化体（以下、マリンプロックと称する）の製造方法^{2)・3)}と藻場材としての評価試験⁴⁾が報告されている。一方、砂に類似した形状を有する高炉水砕スラグの水質改善効

果⁵⁾と底生生物着生効果および塊状製鋼スラグの生物着生⁶⁾などが報告されている。

筆者らは、これまで個々に検証されてきた鉄鋼スラグを複数種組み合わせる人工的に浅場を形成することによる環境修復技術に関して検討を行っている。鉄鋼スラグによる浅場は、100%リサイクル材を用い、天然資源採取による新たな自然破壊を伴わないことを特徴とする。本研究では、マリンプロックを海藻着生基盤、高炉水砕スラグ砂を底質、塊状の製鋼スラグを潜堤として用い、鉄鋼スラグのみを用いた浅場モデルを造成した。

本稿では、「鉄鋼スラグを用いた浅場」の構成材としてマリンプロックに求められる、海藻着生基盤としての機能を検証することを目的に、約2年間にわたり、マリンプロックに着生する生物相について調査した結果について報告する。

2. 試験方法

(1) 鉄鋼スラグによる浅場モデルの造成

2002年3月に広島県因島の海域において、鉄鋼スラグによる浅場モデルの造成を行った。その概念図を図-1に、計画平面図を図-2に示す。藻場造成材として写真-1に示す、天然岩礁を模した擬岩型マリنبロック（1m×1m×0.65m、以下 マリنبロック）を用いた。その原料である粒状の製鋼スラグの組成例を表-1に示す。また、覆砂材として高炉水砕スラグ、および潜堤材として塊状の製鋼スラグを用いた。塊状の製鋼スラグおよび高炉水砕スラグ覆砂材を敷設して約30m×20mの浅場を設けた後、図-2の□で示す位置に、マリنبロックを20個沈設した。写真-2にマリنبロックの沈設工事風景を示す。

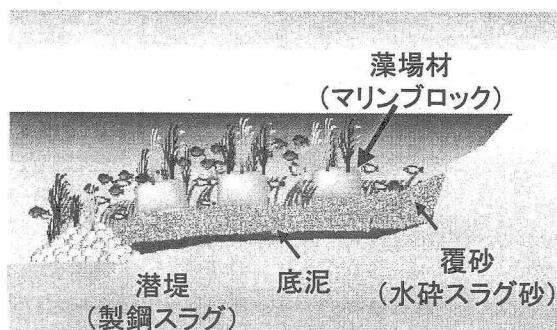


図-1 鉄鋼スラグによる浅場造成の概念図

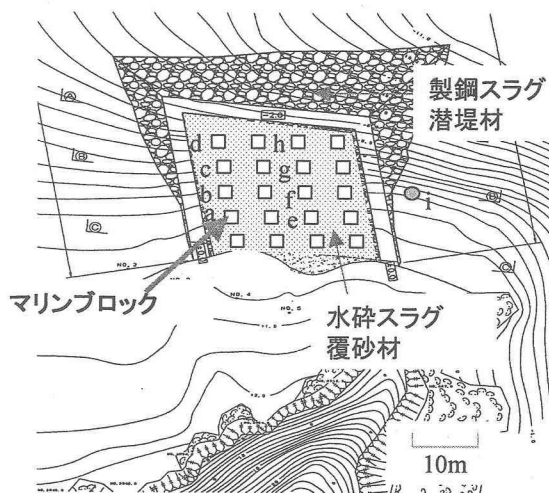


図-2 鉄鋼スラグによる浅場モデルの計画平面図

表-1 マリنبロックの製造に用いた粒状製鋼スラグの組成例

(単位 wt%)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	P ₂ O ₅	MnO
13.8	41.2	4.7	17.3	4.3	6.0	5.3

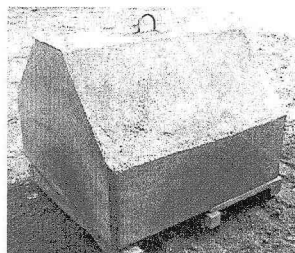


写真-1 擬岩型マリنبロック（1m×1m×0.65m）

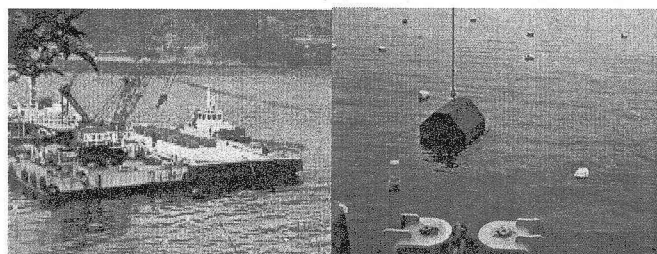


写真-2 マリنبロックの沈設風景

(2) 追跡調査

2002年7月、2003年2月、12月、2004年2月の4回とし、2002年7月は図-2のマリنبロックa～dに着生した海藻の種類を、残りの3回はe～hで示す4ケのマリنبロック、および浅場外の天然転石iについて、大型海藻を中心にダイバーによる観察、海藻の種類、被度、および個体数を調査した。さらに浅場に蟄集した魚類、マリنبロックに着生した動物について2003年8月と2004年2月に調査を実施した。

3. 試験結果

(1) 海藻の着生

2002年7月（造成4ヶ月後）に図-2のa～dで示す4ケのマリنبロックに着生した海藻の種類を表-2に示す。2003年7月には、アカモク、ボウアオノリ（写真-3）、フクリンアミジなど計12種類の海藻が観察された。

表-2 設置4ヵ月後にマリンプロックa～dにて観察された海藻

網	種 名
緑 藻	シオグサ属の1種
	アオサ属の1種
	ボウアオノリ
褐 藻	クロメ
	フクロノリ
	フクリンアミジ
	アカモク
	マメタワラ
	ホンダワラ属の1種
紅 藻	カギケノリ
	ヒラワツナギソウ
	イギス科の数種
	アヤニシキ

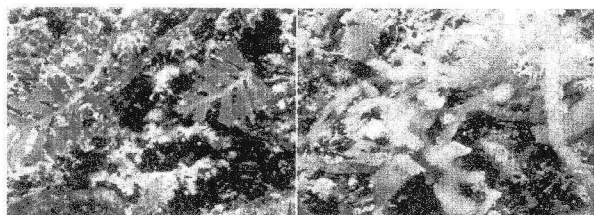


写真-3 マリンプロックに付着したアカモク（左），ボウアオノリ（右）（2002年7月）

2003年2月（造成11ヵ月後），2003年12月（造成21ヵ月後），および2004年2月（造成23ヵ月後）に観察された海藻に関して種類と被度を表-3に示す。2003年12月と2004年2月は周辺海域転石の結果も示す。

2003年2月では，一年生ホンダワラ類であるアカモク，シダモク，タマハハキモクのマリンプロックへの着生が顕著であり，水面上からも容易に観察できるほど生長した（写真-4）。また，アカモクは，成熟個体も観察された。なお，アカモクやシダモクなど一年生のホンダワラ類の成体は春季に卵，精子を放出後，枯死流失することが知られている⁷⁾。マリンプロック上のアカモク，シダモクの成体も6月に流失した。

2003年12月では，マリンプロックe では多年生大型褐藻類であるクロメやマメタワラ，一年生ホンダワラ類のタマハハキモクが確認された。これら大型藻類の下草相として，多年生の紅藻類であるカバノリやフシツナギなどがみられた。これより深い水深に位置するマリンプロックf, g, hでは，一年生ホンダワラ類であるアカモク，シダモクが繁茂し，マリンプロックe と同様な下草相がみられた。特に，マリンプロックh では，多年生の大型褐藻類であるノコギリモクも確認された。

表-3 マリンプロックおよび浅場周辺の転石帯で観察された海藻類（2003年2月，12月，2004年2月調査）

観察時期		2003年2月 ^{*1}				2003年12月 ^{*2}					2004年2月 ^{*2}				
観察した固化体/地点		e	f	g	h	e	f	g	h	i	e	f	g	h	i
固化体上面の水深(cm)		1.5	2.1	2.7	3.1	1.5	2.1	2.7	3.1	3.8	1.5	2.1	2.7	3.1	3.8
大型海藻	クロメ 被度%					+					+				
	個体数 ^{*3}					1					1				
	全長(cm)					20					60				
	シダモク 被度%	30	60	70	70		+	5	5	10		30	90	60	40
	個体数 ^{*3}	-	-	-	-		1	5	5	14		5	24	32	2
	全長(cm)：最小-最大	22-65	90-280	110-320	65-170		50	15-50	10-40	10-30		60-350	10-320	8-260	190-350
	アカモク 被度%	60	30	30	30		5	30	30	+		50	5	30	
	個体数 ^{*3}	-	-	-	-		8	35	21	3		4	3	20	
	全長(cm)：最小-最大	140-320	350	370	390		15-70	5-60	2-125	10-20		190-520	4-90	3-530	
	ノコギリモク 被度%								+					+	
	個体数 ^{*3}								1					1	
	全長(cm)								14					18	
小型海藻	タマハハキモク 被度%	10	10			+	+				30	+	+		
	個体数 ^{*3}	-	-			3	2				9	1	1		
	全長(cm)：最小-最大	140-320	40-120			3-40	1-25				30-170	80	90		
	マメタワラ 被度%					+						+			
	個体数 ^{*3}					1						1			
	全長(cm)					15						40			
	緑藻類 被度%							+	+	+	+	+	+	+	+
	種類数							2	1	1	2	1	4	4	2
	褐藻類 被度%					+	5	+		+	+	+	+	+	
	種類数					1	1	1		1	3	3	2	3	
	紅藻類 被度%	10				20	15	5	+	65	100	30	10	10	30
	種類数	3				8	6	6	4	12	12	10	7	6	8
種 類 数 合 計		6	3	2	2	12	10	11	8	16	19	18	16	16	11

注*1 比較的着生が良好な部位の25cm×25cm方型枠内について測定

*2 炭酸固化体の上面および斜面について測定

*3 炭酸固化体については上面および斜面について測定。周辺については、測定点の1m²当たりの本数を測定。

2004年2月では、マリنبロックf, g, hでは、アカモクやシダモクが生長し、2003年2月調査と同様に大型の個体が水面に棚引いていた。そのうちの数個体には生殖器床が形成されていた。

海藻の種類数の推移に着目すると、2003年2月では、調査対象の各マリنبロックに2～6種類（4つのマリنبロックの合計で6種類）であった。以降、2003年12月の調査時は、8～12種類（合計19種類）、2004年2月では15～19種類（合計30種類）となり、海藻の種類数が増加した。

一方、周辺の転石では、2003年12月には16種類で、そのうち大型海藻は2種類、2004年2月には11種類で大型海藻は1種類が確認された。大型海藻の被度の合計は2003年12月で10%、2004年2月で40%に留まった。ただし潮流などの海況条件や付着基盤形状などが異なるため、この調査結果からマリنبロックと天然転石の基質の優劣を論じることは困難である。

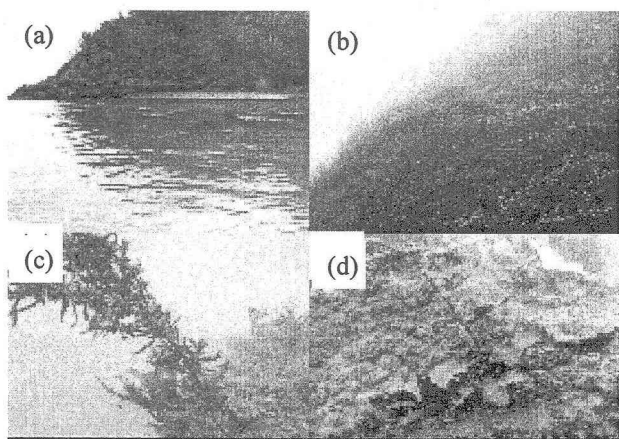


写真-4 海藻の着生状況

(a), (b) ホンダワラ類(2003年2月), (c) タマハハキモク(2003年12月), (d) ノコギリモク(2003年12月)

(2) 蛸集した魚類

2003年8月、2004年2月において浅場で観察された魚類を表-4に示す。浅場上では8月で17種（潜堤部と合計すると22種）で、メバル、ハゼの仲間は群れで遊泳している様子が観察された。2004年2月には9種の魚類が観察され、キヌバリの幼魚などがホンダワラ類に蛸集する様子が観察された。なお、観察された魚類はヒメハゼ、サビハゼ、イシガレイなどマリنبロックの設置基盤である高炉水砕スラグ覆砂材の表面で観察された魚も含まれていた。一方、浅場外周辺海域の観察で確認された魚類は、8月で8種、2月で3種にとどまり、魚の数も一部を除いて少数であった。

表-4 浅場および浅場外周辺海域で観察された魚類
(2003年8月調査)

目	科	和 名	2003年8月		2004年2月	
			浅場	周辺	浅場	周辺
ヨウジウオ	ヨウジウオ	サンゴタツ			r	
		ハナタツ			r	
スズキ	ボラ	ボラ	r			
	キス	シロギス	r			
	タイ	マダイ	+			
		クロダイ	rr			
	ベラ	ホンベラ	+	r		
		キュウセン	c	+		
	ハゼ	スジハゼ	c	cc	+	
		ヒメハゼ	cc	r	+	
		アカオビシマハゼ	c	+	r	r
		サビハゼ	c	rr	+	
		キヌバリ	rr		+	
カサゴ	フサカサゴ	メバル	c	r		
		ウスメバル			r	r
	ハオコゼ	ハオコゼ	c			+
	カジカ	アナハゼ属	r			
ウバウオ	ネズボ	ネズボ科	+	r		
カレイ	カレイ	イシガレイ			r	
フグ	カワハギ	アミメハギ	c			
	フグ	クサフグ	r			
種 類 数			17	8	9	3

注)cc:極めて普通 c:普通 +:出現 r:稀 rr:極めて稀

(3) 表面に付着していた動物

マリنبロック表面に付着していた動物は、2003年2月で8種、2004年2月は14種類であった。ナマコ、ヒトデなどの移動性種が観察されたほか、オオヘビガイ、サンカクフジツボ、シロボヤなどの固着性生物が観察された。

4. 考察

(1) コンクリートブロックとの比較試験例

本研究の浅場上でのマリنبロックは、鉄鋼スラグのみを用いた浅場造成という位置付け上、比較材を近傍に置いていない。同条件の比較材と評価した例として静岡県沼津の試験例を紹介する。沼津市内浦湾の水深6mの海底に、をプレート形マリنبロック(25cm×25cm×5cm)を5枚作製し、2002年10月に設置した。比較材として、コンクリートブロック、天然石(花崗岩)も同海域に同条件で設置した。2003年2月の観察結果を図-7に示す。マリنبロックにはフクロノリ、カバノリが被度90%で着生した。これに対し、コンクリートブロックと天然石は被度がそれぞれ25%、15%であり、マリنبロックの優位性が示された。さらに、神奈川県城ヶ島の水深7mの海域において実施された、1m×1m×1mサイズのマリنبロックへのカジメの着生試験⁹⁾についても、同条件のコンクリートブロックよりもカジメの着生量が多い結果が得られたほか、沖縄県での珊瑚の着生の優位性⁹⁾も報告されている。以上よりマリنبロックはコンクリートブロックと同等もしくはそれ以上の海藻付着基盤としての性能を有すると考えられる。

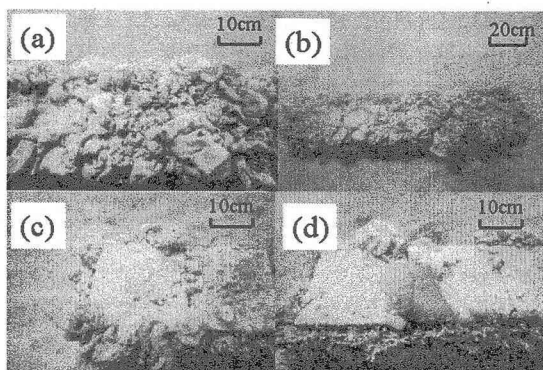


写真-5 静岡県沼津市に沈設したプレート状マリブロックおよび比較材の外観 (2003年2月調査)
(a) マリブロック近景, (b) マリブロック全景,
(c) コンクリートブロック近景, 天然石近景

(2) マリブロックへの海藻着生

アカモクの卵放出時期は概ね春季であると言われている¹⁰⁾。2002年7月に、海藻アカモクの幼体が観察されたことは、3月の設置後に近隣の成熟したアカモクから放出された卵が着底したことによると考えられる。2003年2月はマリブロック上のアカモクに成熟個体が観察されたことから、2003年12月以降に観察されたアカモクは実験区域内において再生産された分も含まれていると思われる、浅場内での世代交代が行われたと考えられる。

一般に海藻の植生の遷移が極相に達するまでの期間は2～5年¹¹⁾とされている。2003年2月(11ヶ月後)までは一年生海藻のみであったが、2003年12月(21ヶ月後)調査時には、多年生ホンダワラ類であるマメタワラや多年生褐藻のクロメの着生が見られ、一年生海藻と多年生海藻の共存状態に遷移した。これは、一年生海藻の優占の後に、多年生海藻が優占するという、海藻の遷移に見られる法則性¹¹⁾と傾向的に一致している。しかし、周辺海域では一年生ホンダワラ類が多いことから、多年生海藻が優占するに至らない状態で極相に達する¹¹⁾ケースであると推定される。

マリブロックへのホンダワラ類の着生が顕著であった理由として、以下の2点が挙げられる。第1点は、マリブロックの表面が多孔質で凹凸を表面に多く有していることが着底に有利となった可能性がある。マリブロックの最大表面粗度が $328\mu\text{m}$ (触針法で 0.2cm/s , 幅 50mm の測定値)¹²⁾であり、アカモクの卵の大きさ($200\sim 300\mu\text{m}$)¹³⁾よりやや大きかった。一方、コンクリートブロックは、表面が平滑であり、疎らに存在する孔についても表面粗度が $273\mu\text{m}$ ¹²⁾とマリブロックよりも小さかった。第2点は、海水のpHへの影響が小さいことが考えられる。試験体: 海水の体積比を1:10として行ったマリブロックの海水浸漬試験¹⁴⁾にて、pHが7.9の人工海水が8.3に上昇した。普通コンクリートの同様の試験例¹⁵⁾では、人工海水のpHが8.2から8.9に上昇することが示されていることから、マリブロックの海

水への影響はコンクリートブロックに比較して小さいと考えられ、アルカリ成分の幼胚への影響も小さいことが示唆される。

(3) 鉄鋼スラグによる浅場におけるマリブロックの有用性

一般的に「浅場」は、水深 $10\text{m}\sim 15\text{m}$ で見られることの多い灘落ちと呼ばれるやや急な斜面に変わる部位よりも浅い側の海域で、周年冠水している浅海域を指し、藻場や礁、岩なども含まれている¹⁶⁾。天然の浅場が有する機能は、①(岩礁・転石への)海藻着生場、②(砂への)海藻着生場、③着生した海藻、海藻類への魚類の蟄集・稚仔の生育場の形成、④底生生物棲息、⑤生物の生産活動、漁獲による海水・底質改善(有機物除去)などが挙げられる。

マリブロックは、「鉄鋼スラグによる浅場」の構成材料として①、③の機能が求められる。①の機能については先に述べた結果などによりほぼ実証されたと考えられる。加えて、ホンダワラ類に魚類が蟄集する様子が観察されたことから、③についても機能していることが示唆された。以上より、鉄鋼スラグを用いて造成した浅場を構成する藻場材として、マリブロックの有用性が認められた。なお、他の構成材である高炉水砕スラグ覆砂材、塊状製鋼スラグ潜堤材への生物着生¹⁷⁾に関しても現在良好な結果が得られており、鉄鋼スラグを用いた浅場の生物着生による環境改善効果が明らかになりつつある。

5. 結言

広島県因島の海域において、2002年3月に鉄鋼スラグのみを用いた浅場モデルを造成し、その藻場材として沈設した鉄鋼スラグ炭酸固化体(マリブロック)に着生する生物相について調査した。その結果、鉄鋼スラグを用いて造成した浅場を構成する藻場材として、マリブロックが有用であることが認められた。

- ①設置後4ヶ月で12種の海藻が着生し、1年後には一年生ホンダワラ類が繁茂し、生殖器床も形成された。以降、多年生大型褐藻類が加わるなど、海藻の種類数が増加した。
- ②浅場で観察された魚類は種類数、個体数ともに、浅場外周辺よりも多かった。マリブロック上には、ナマコ、ホヤなどの動物がみられた。
- ③幼胚の大きさよりも大きな凹凸を有し、基質から溶出したアルカリ成分の幼胚への影響が小さいことが、海藻が着生しやすい理由と考えられた。
- ④マリブロックには、コンクリートブロックと同等もしくはそれ以上の海藻付着基盤としての性能を有すると考えられた。

謝辞：本研究で用いた浅場の造成は、2001年度広島県補助事業として行ったもので事務局の広島県商工労働部殿に親身にお世話いただきました。また浅場造成試験場所を提供くださった因島市殿、因島市漁業協同組合殿、試験遂行にご協力いただいた大新土木株式会社殿と株式会社水棲生物研究所殿、および沼津の試験に関してご指導いただいた東海大学海洋学部 上野教授（現 海洋学部長）に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブック その計画・技術・実践 第1巻総論編，株式会社ぎょうせい，2003
- 2) 高橋達人：新材料としての製鋼スラグ炭酸固化体版下新材料としての製鋼スラグ炭酸固化体，コンクリート工学，38，pp.3-9,2000.
- 3) 福原実：炭酸固化技術の歴史から製鋼スラグの炭酸固化に関して，J. Soc. Inorg. Mater. Japan, 11, 2004.
- 4) Tsuneo Isoo, Tatsuhito Takahashi and Minoru Fukuhara: *Using Carbonated Steelmaking Slag Blocks to Help Reduce CO₂*, American Ceramic Society Bulletin, pp.73-75, 2001.
- 5) 宮田康人，沼田哲始，豊田恵聖，佐藤義夫，小田静，岡本隆：高炉水砕スラグの底質改善効果，土木学会第25回海洋開発シンポジウム海洋開発論文集，16，pp.345-350，2000.
- 6) 沼田哲始，宮田康人，藪田和哉，高橋達人，豊田恵聖，佐藤義夫：鉄鋼スラグによる沿岸環境改善技術，NKK技報，177，pp.47-51，2002.
- 7) 能登谷正浩編：藻場の海藻と造成技術，株式会社成山堂書店，pp.180-189，pp.1-16，2003.
- 8) 小山田久美、月館真理雄、高橋達人：カジメ藻場における多孔質炭酸固化体実海域実証試験，平成16年度日本水産工学会学術講演会論文集，2004。（発表予定）
- 9) 小山田久美，高橋達人，岩尾研二：多孔質炭酸固化体を用いたサンゴ幼生着生試験，日本サンゴ礁学会第6回大会要旨集，2003.
- 10) 日本水産学会編：藻場・海中林，ガラモ場，恒星社厚生閣，pp.142-156，pp.20-30，1981.
- 11) 片田実：海藻の生活形と遷移，日本水産学会誌，29，pp.798-808，1963.
- 12) 磯尾典男，高橋達人，岡田光正：藻場造成用基質としての炭酸固化体の評価，日本水産学会誌，66，647-650，2000.
- 13) 堀輝三編：藻類の生活史集成 第2巻 褐藻・紅藻類，pp.160-161，1933.
- 14) 鈴木操，小山田久美，高橋達人，渡辺圭児：藻場造成礁用鉄鋼スラグ炭酸固化体の開発，コンクリート工学，42，pp.14-20，2004.
- 15) 財団法人 沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体 技術マニュアル，pp.31-33，2003
- 16) 社団法人 海洋産業研究会：多目的干潟・藻場・浅場の造成に関する調査研究報告書（昭和63年度後期自主研究事業），pp.5，1989.
- 17) 2004年発表予定