

# 鉄鋼スラグの化学的・物理的特性の違いによる岩礁性藻場造成モデルの構築

宇部工業高等専門学校 杉本憲司

## 1. 研究背景

近年、藻場などの漁場が減少しており、その回復は急務となっていることから、全国各地で藻場再生事業が行われている<sup>1),2)</sup>。一方、循環型社会への転換のために産業副産物のリサイクル促進が求められており、リサイクル材として鉄鋼スラグを用いた岩礁性藻場造成に関する研究が行われている<sup>3)</sup>。岩礁性藻場生育基盤材料として求められる条件として、設計を忠実に施工するために品質が常に揃っている必要がある。鉄鋼スラグは、炉の種類や鉄鋼の製造工程が同じならば品質は概ね揃っているが、設計段階と同一の鉄鋼スラグが大量に入手できるかは不透明であり、炉の種類や鉄鋼の製造工程によって、化学的・物理的特性が異なる。鉄鋼スラグのうち製鋼工程で発生する製鋼スラグを岩礁性藻場生育基盤材料として利用する場合は、設計に必要な物理的条件としては粒度組成や水中単位体積重量などがあり、化学的条件として水和反応による pH 上昇の可能性はある。

本研究は、化学的・物理的特性の異なる製鋼スラグを用いて、着生する藻の種類や量及び水質などへの影響について明らかにし、岩礁性藻場生育基盤材としての特性から藻場造成モデルを構築することが目的である。

## 2. 研究方法

### 2-1. 実験で用いた材料

炉の種類や鉄鋼の製造工程が異なる製鋼スラグを 3 種類(スラグ A、スラグ B、スラグ C)(図 2-1-1)準備し、室内実験と海域実験を行った。また、対照材料として従来岩礁性藻場生育基盤材料として使用されている天然石を用いた。なお、製鋼スラグは製造工程によって発生する粒径が異なるが、海域実験において製鋼スラグ B については 3 種類の粒度が異なる材料を用いた。



図 2-1-1. 使用した製鋼スラグ

(左：製鋼スラグ A、中：製鋼スラグ B、右：製鋼スラグ C)

## 2-2. 室内実験

室内実験は、海水に浸す前と海域に設置し海水に浸され一定期間毎にサンプリングを行った各製鋼スラグ及び天然石を用いて行う。物理的特性として表面粗さについて実験を行った。また、化学的特性として表面元素組成及びカラムを用いた溶出試験を行った。

表面粗さは材料表面の物理的特性を調べるためにカラーレーザー顕微鏡(株式会社キーエンス：VK9700/VK9710SP2214)で表面粗さの分析を行う。表面元素組成は、材料表面の化学的特性を調べるために蛍光X線分析装置(Bruker AXS K.K：AXS M4 TORNADO-YS)で分析を行った。

各材料からのカルシウム溶出による水酸化物イオンに伴う pH 上昇を確認するために、一定サイズ(10mm 程度)に粉砕した材料をカラムに入れ、連続的に一定量の溶媒をカラムに送り、カラム出口における pH を連続的に測定した(図 2-2-1)。なお、実験条件として 20℃、1mL/s の溶媒をカラムへ送り、溶媒は塩分濃度を変化させた。

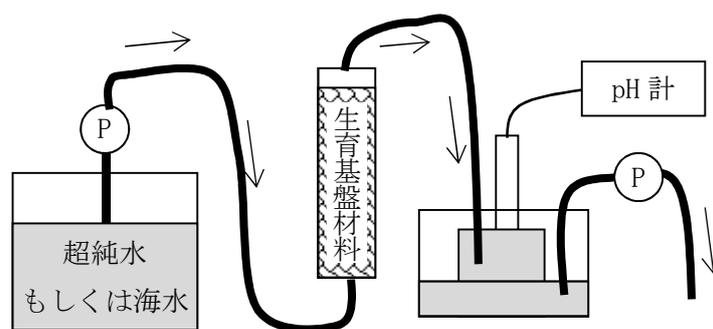


図 2-2-1. 生育基盤材料からの溶出実験概要

## 2-3. 海域実験

海域実験として 2014 年 7 月に各製鋼スラグ及び天然石を山口県岩国市由宇町神東地先(図 2-3-1)において、海藻生育適地環境(D.L.-5m 付近、最大潮流 50cm/s 以内)に設置し、海藻の着生状況や水質状況の把握を行った。海藻の着生状況として、海域に設置した各材料に着生した海藻の種類について潜水観察で確認するとともに、海藻の坪刈りを行い、実験室に持ち帰って海藻の同定を行った。水質状況の把握を行うために、設置した材料の直上水を採水し、pH、全窒素及び全リン濃度の分析を行った。

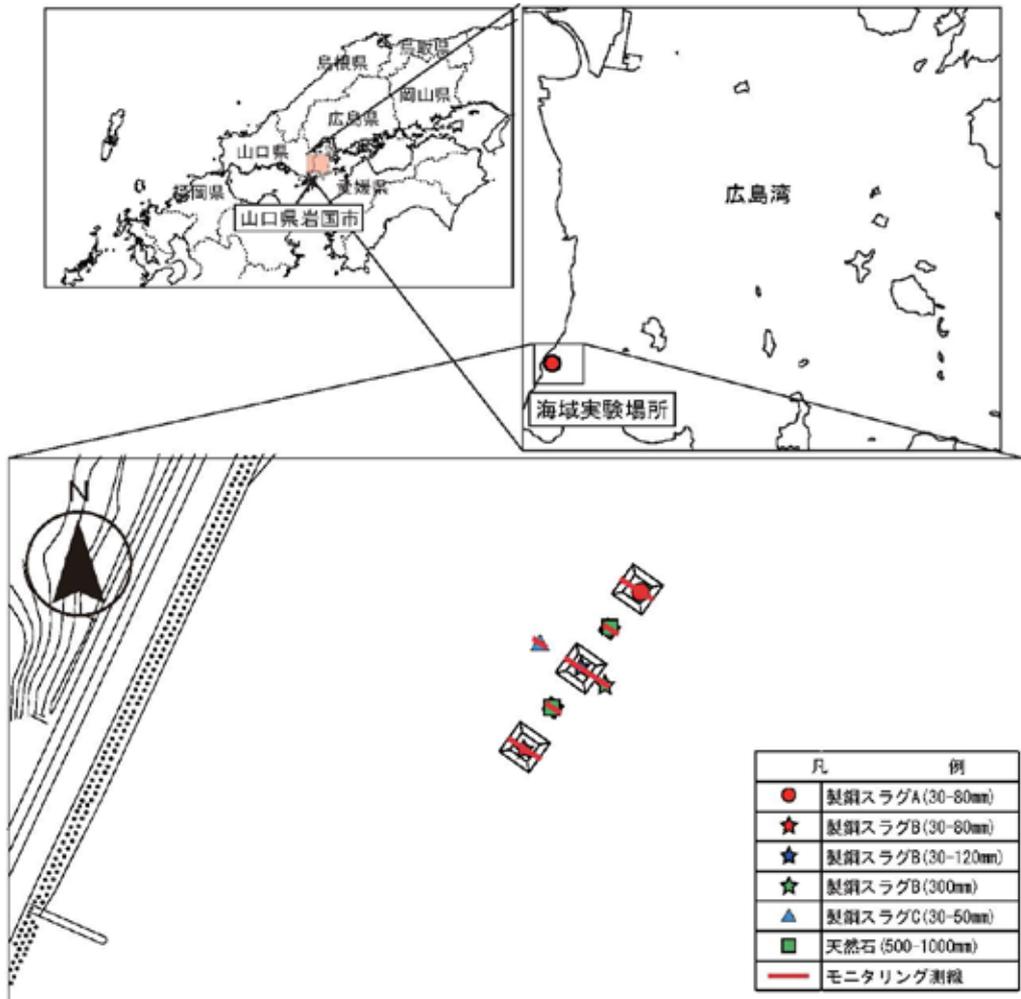


図 2-3-1. 海域実験調査地点図

### 3. 研究結果

#### 3-1. 室内実験

図 3-1-1 に製鋼スラグ 3 種類と天然石における表面粗さ及び元素組成比率を示す。Rp は粗さ曲線の最大山高さ、Rv は粗さ曲線の最大谷高さ、Rz は最大高さ、Ra は算術平均粗さ、Rq は二乗平均平方根粗さである。

製鋼スラグ A と製鋼スラグ B の表面粗さは、Rp、Rv 及び Rz についての差はほとんどなかったが、Ra 及び Rq では製鋼スラグ A のほうが表面粗さは大きく差があった (Ra :  $p < 0.10$ 、Rq :  $p < 0.10$ )。製鋼スラグ A と製鋼スラグ C の表面粗さについては、すべての表面粗さで製鋼スラグ C が大きかったが、統計的な有意差はなかった。製鋼スラグ A と天然石の表面粗さについては、すべての表面粗さで天然石の方が大きく差があった (Rp :  $p < 0.05$ 、Rv :  $p < 0.05$ 、Rz :  $p < 0.05$ 、Ra :  $p < 0.01$ 、Rq :  $p < 0.01$ )。

元素組成比率では、製鋼スラグで Ca 及び Fe の比率が高く、天然石では Si の比率が高くなっていた。

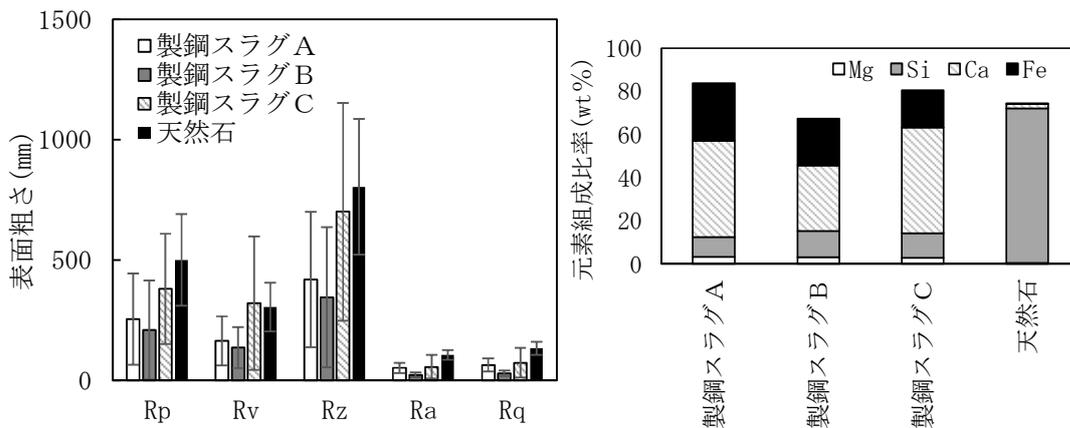


図 3-1-1. 製鋼スラグ分析結果(左：表面粗さ、右：元素組成比率)

図 3-1-2 は製鋼スラグ 3 種類における溶出試験結果である。溶媒が純水の際には製鋼スラグにおいては製鋼スラグ A が最も pH が上昇し、製鋼スラグ B では pH が 9 以下であった。溶媒の塩分濃度が高くなるにつれて、pH の上昇が抑制されており、海水の塩分濃度である 3.0% ではすべての製鋼スラグで 8.2 前後と瀬戸内海における海水中の pH とほとんど差はなかった。

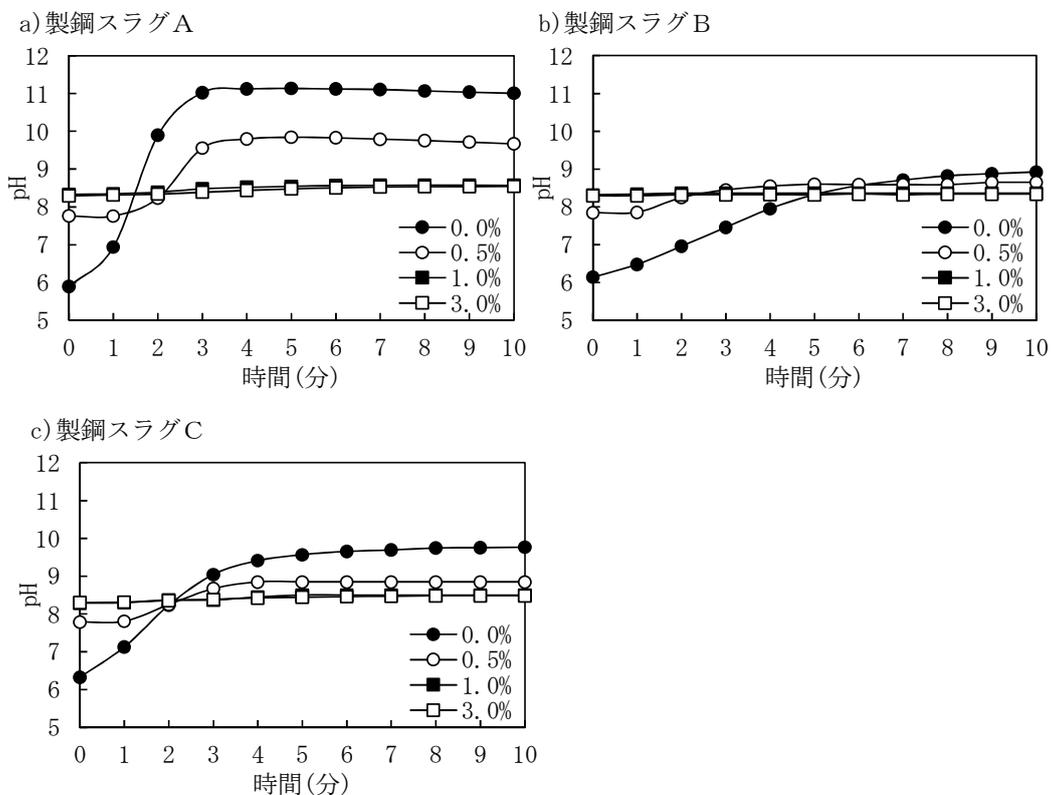


図 3-1-2. カラムによる溶出実験結果

### 3-2. 海域実験

図 3-2-1 に製鋼スラグ、天然石及び周辺天然藻場に出現した海藻種類数の推移を示す。製鋼スラグ等を海域に設置して 11 ヶ月である 2015 年 6 月まで海藻出現種類数は製鋼スラグ C を除いて製鋼スラグの種類や粒径に関わらず概ね増加していた。2015 年 12 月において製鋼スラグ B (30-120mm) に着生した海藻の種類数がやや多かったものの、他の製鋼スラグ及び天然石ではほとんど差がなく 10 種類程度であった。

図 3-2-2 に 2014 年 8 月～2015 年 12 月における海藻被度を示す。また、図 3-2-3 に 2015 年 6 月における海藻の着生状況を示す。2014 年 11 月には下草である紅藻類を中心に着生被度が増加し、2015 年 6 月にはすべての材料で海藻着生被度が 40% 以上となり、特に製鋼スラグ 3 種類では 80% 程度となり、製鋼スラグの種類によって大きな差はなかった ( $p > 0.95$ )。2015 年 12 月においては、粒径が 30-80mm である転炉系製鋼スラグと低塩基製鋼スラグの海藻着生被度に有意な差はなかった ( $p > 0.95$ )。

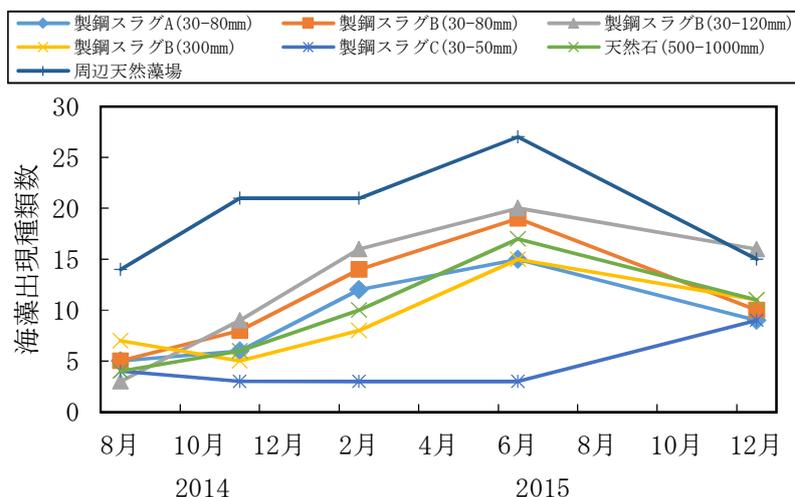


図 3-2-1. 生育基盤材料及び周辺天然藻場における海藻種類数の推移

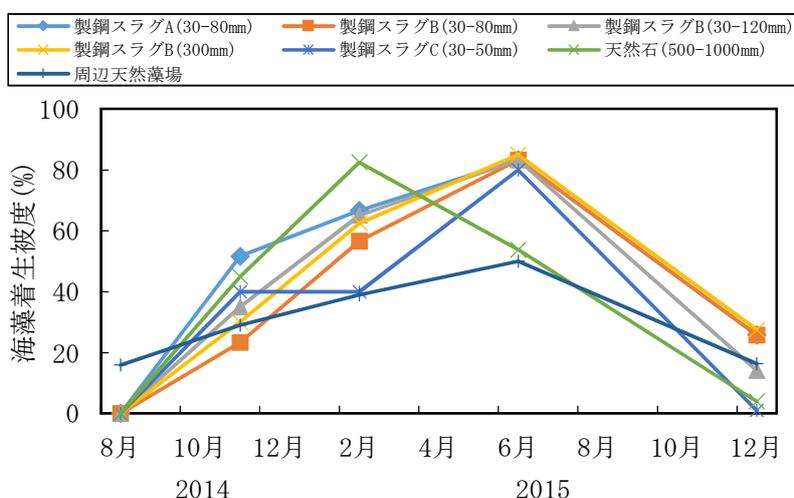


図 3-2-2. 造成区域及び周辺天然藻場における海藻被度

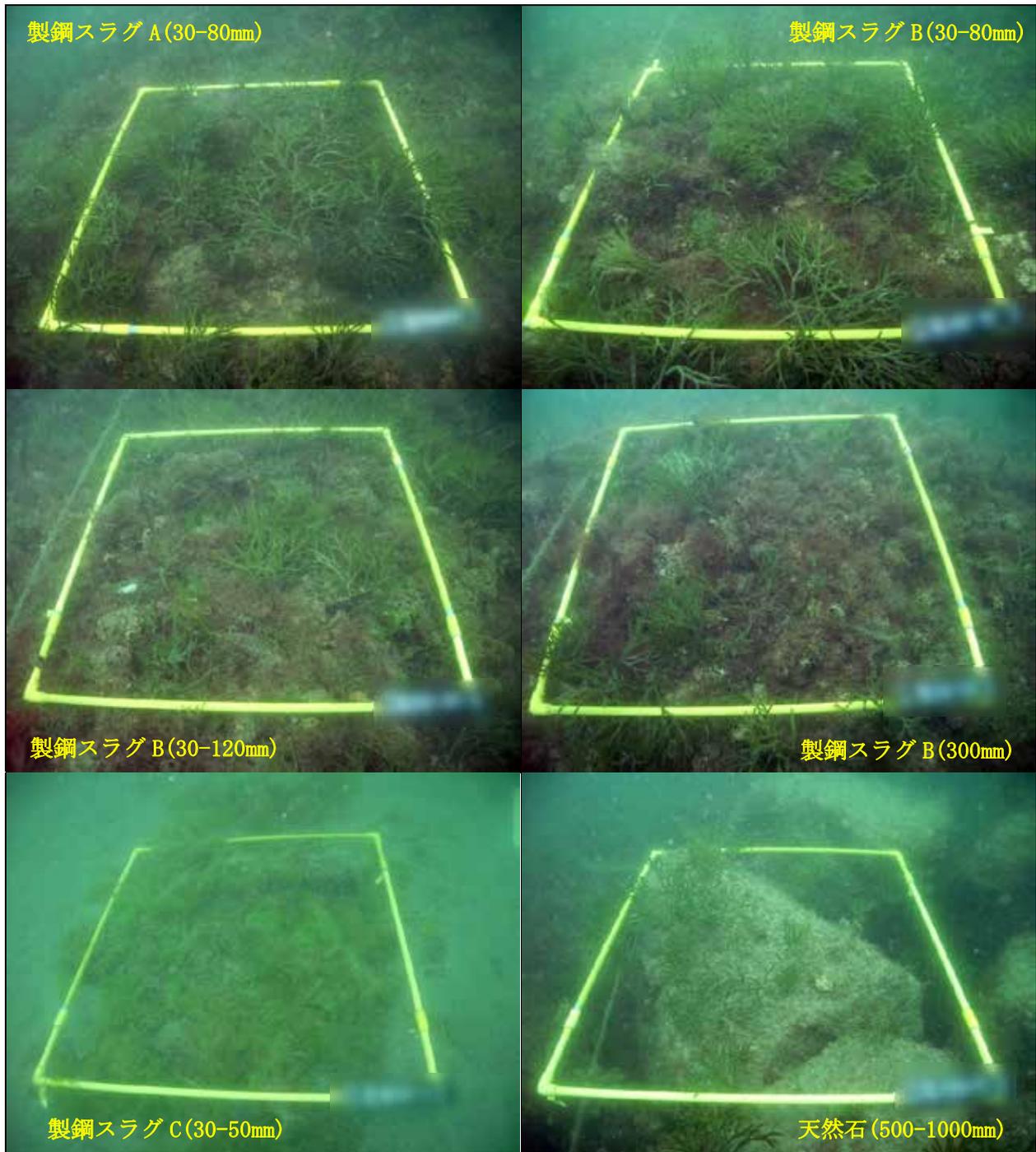


図 3-2-3. 2015 年 6 月における海藻着生状況

表 3-2-1 に 2015 年 2 月～12 月の坪刈による海藻の優占種について示す。また、図 3-2-4 に 2014 年 8 月～2015 年 12 月の坪刈による海藻の湿重量の推移を示す。2015 年 6 月における海藻の着生量は、製鋼スラグ A (30-80mm) では 675～3104g/m<sup>2</sup>(平均 1568g/m<sup>2</sup>)、製鋼スラグ B (30-80mm) では 1024～2536g/m<sup>2</sup>(平均 1834g/m<sup>2</sup>)、製鋼スラ

グ B (30-120mm)では 677~1979g/m<sup>2</sup>(平均 1356g/m<sup>2</sup>)、製鋼スラグ B (300mm)では 435~586g/m<sup>2</sup>(平均 499g/m<sup>2</sup>)、製鋼スラグ C (30-50mm)では 5~16g/m<sup>2</sup> (平均 11g/m<sup>2</sup>)及び天然石では 278~990g/m<sup>2</sup>(平均 543g/m<sup>2</sup>)であった。海藻の着生量は、最大粒径が 80~120mm で多くなり、それよりも粒径が大きくなると減少していった。一方、最大粒径が 50mm 程度の製鋼スラグ C では海藻の着生量が少なく、表面粗さは天然石とほとんど差がなかったことから、粒径が小さいことが原因であったと推察された。

これらの結果から、元素組成の化学的な違いによって海藻着生種類や量に大きな違いはなかったが、粒径の違いによって海藻の着生量に差があった。

表 3-2-1. 海藻優占種(2015年2月~2015年12月)

	粒径 (mm)	2015年2月		2015年6月		2015年12月	
		種名	割合 (%)	種名	割合 (%)	種名	割合 (%)
製鋼スラグ A	30-80	エナシダシヅア	89.6	ヒラミリン	38.0	エナシダシヅア	90.0
				ナガミル	16.7		
製鋼スラグ B	30-80	エナシダシヅア	38.8	ナガミル	56.9	エナシダシヅア	57.1
		ミル属	11.8	クロミル	14.2	マクサ	21.4
	30-120	エナシダシヅア	60.0	ナガミル	50.1	アオサ属	25.9
		ミル属	31.5	エナシダシヅア	14.9	エナシダシヅア	40.7
	300	エナシダシヅア	80.1	ナガミル	56.2	ウミウチワ	87.0
		アオサ属	19.9	エナシダシヅア	22.4		
製鋼スラグ C	30-50	アオサ属	40.5	アオサ属	59.1	タマハキモク	36.0
		エナシダシヅア	26.2	ミル属	36.4	ヒシギ	32.0
						ウミウチワ	12.0
天然石	500-1000	エナシダシヅア	54.2	ナガミル	61.5	ウスカリカニテ	37.5
		ミル属	38.2	エナシダシヅア	22.6	マクサ	31.3
						アカモク	25.0

注) 組成率 10%以上の上位 3 種を優占種とした。

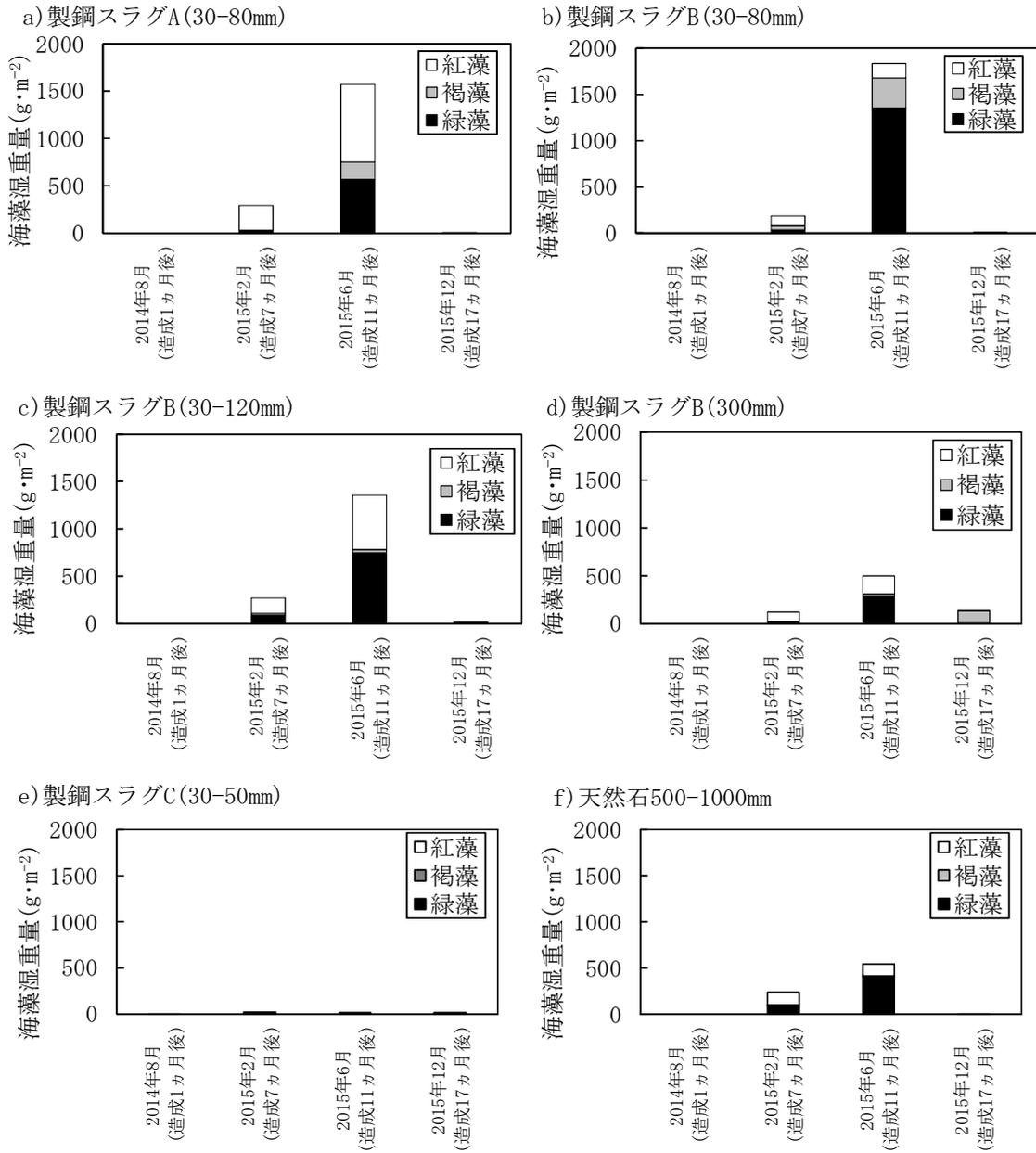


図 3-2-4. 坪刈による海藻湿重量の推移

図 3-2-5 に 2014 年 8 月～2015 年 12 月の製鋼スラグ 3 種類、天然石及び周辺天然藻場の直上水における pH、全窒素及び全リンの分析結果を示す。調査期間中における直上水の pH、全窒素及び全リンは、ほとんど差がなく、水質によって海藻着生種類や量に差はなかったと考えられた。

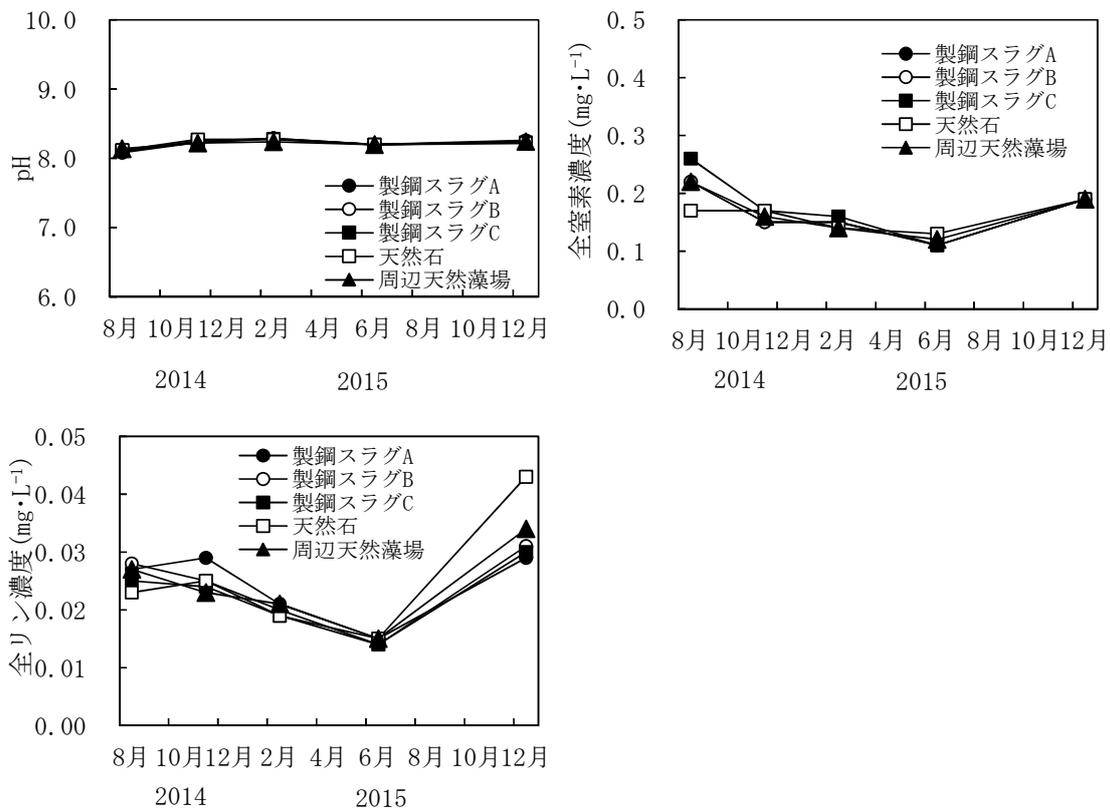


図 3-2-5. 直上水における水質分析結果

#### 4. 研究のまとめ

本研究は、化学的・物理的特性の異なる製鋼スラグを用いて、着生する藻の種類や量及び水質などへの影響について明らかにし、岩礫性藻場生育基盤材としての特性から藻場造成モデルを構築することを目的とした。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 本研究で用いたすべての製鋼スラグで溶媒の塩分濃度が高くなるにつれて、pHの上昇が抑制されており、海水の塩分濃度である3.0%ではすべての製鋼スラグで8.2前後と瀬戸内海における海水中のpHとほとんど差はなかった。
- 2) 製鋼スラグの元素組成の化学的な違いによって海藻着生種類や量に大きな違いはなかったが、粒径の違いによって海藻の着生量に差があった。特に最大粒径が50mm以下の場合には、それ以上の最大粒径と比較して、海藻着生量が1/100程度となった。
- 3) 製鋼スラグの直上水におけるpH、全窒素及び全リン濃度は天然石直上水や周辺天然藻場と差はほとんどなかった。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の支援により実施されました。ここに謝意を表します。

## 引用文献

- 1) 杉本憲司, 中野陽一, 土田孝, 岡田光正, 浚渫土を利用した藻場生育基盤造成による藻場生態系の長期評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol71(2), I\_1447-I\_1452, 2015
- 2) 杉本憲司, 平岡喜代典, 谷田和夫, 寺脇利信, 岡田光正, 浚渫跡地での埋め戻しによるアマモ場の回復, 水環境学会誌, 31(4), 217-221, 2008
- 3) 杉本憲司, 中野陽一, 高濱繁盛, 山本民次, 土田孝, 関根雅彦, 岡田光正, 製鋼スラグを用いた岩礁性藻場生育基盤の造成, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol70(2),I\_1231-I\_1235, 2014