

## 瀬戸内海の有用生物資源創出に向けた

### 鉄鋼スラグ水和固化体の最適仕様に関する研究

広島工業大学 大学院工学系研究科建設工学専攻  
准教授 石垣 衛

#### 1. はじめに

2010年の国連環境計画（UNEP）によれば、『生態系の破壊による世界の経済的損失は年間約420兆円』とされ、今後、『ただ同然』と考えられがちな『自然の価値』を『経済価値』に置き換えることの必要性が示されることで、自然環境は資源であることが認識されつつある。瀬戸内海の生物資源は、埋立による浅場（干潟・藻場）の消失や海砂採取による浚渫窪地の出現等の影響により、その生物生産力が低下の一途を辿ることで劣化状態にある。この状況を修復・再生するためには新たな生物生産基盤を設けることで生産力を再生・修復することが必要である。一方で、瀬戸内海の中小港湾・一般漁港を含めた港の数は約3,000程度存在しており、そのほとんどが昭和40年代に築港されたことから、今後の港の維持管理に向けての補修事業が必要とされる。しかしながら、物流や漁業者数の減少にともない、必要とされる港も減少することが考えられ、補修事業はその後の利活用を含めて検討がなされるべきである。

本研究では、瀬戸内海に生息する多様な生物資源を『環境資源』として位置づけ、当該資源の創出に向けた技術として『鉄鋼スラグ水和固化体を用いた生物基盤構造物』を考案し、当該技術の最適形状や適用方法の構築について基礎的な研究を実施する。ここで、水産有用種であるアワビを瀬戸内海における『環境資源』と位置付け、図1.1に示す広島港元宇品地区において当該資源を創出できる可能性について検証を行った。また、生物基盤構造物の適用先として、今後の瀬戸内海に出現する低・未利用港湾を捉え、構造物の設置による港湾機能の補修はもとより、当該域の生物生産性を向上させることで、鉄鋼スラグ水和固化体が環境資源の保全・再生に貢献する技術であることを示す。



図 1.1 広島港元宇品地区

## 2. 広島港内における環境資源としてのアワビの生息状況

### 2.1 調査概要

広島港内における環境資源として水産有用種のアワビを選定し、その生息条件の抽出を目的とした調査を実施した。調査対象地区に設定した図 2.1 に示す広島港元宇品地区において、地形形状（水深）、基質性状、水質、生物出現種の調査を実施した。ここで、水産有用種が多数確認されている図中に示す広島湾の大カクマ地区を比較対照区に設定し、元宇品地区との比較において、広島港内の水産有用種の生息条件を抽出した。

### 2.2 調査地点および方法

調査は、平成 25 年 4 月 26 日に広島港元宇品地区、大カクマ地区の海岸にて実施した。

調査体制は、潜水士 2 人が機器計測および目視観測を行い、作業船および陸上にて安全監理を目的とした監視・警戒者を設置した。調査方法は、多目的水質プロファイラーを使用して水質調査を行った。基質調査については、調査測線を陸から沖へ向かう法線で設定し、ロープを用いて、法線方向へ 1 m 間隔で水深を計測した。水産有用種出現状況については、図 2.2 に示すとおり潜水士が目視によって確認した。



広島港元宇品地区および大カクマ地区位置図

大カクマ地区海岸

図 2.1 広島湾および広島港内における調査対象地区

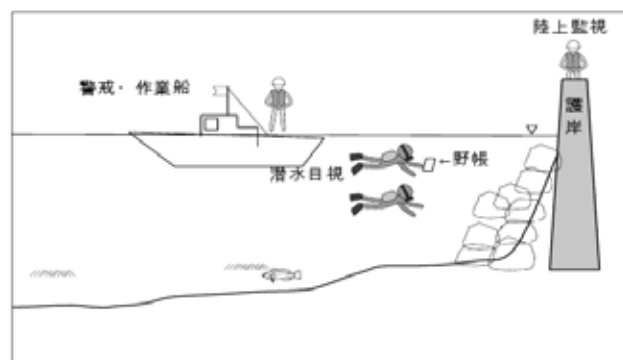


図 2.2 調査方法（イメージ図）

### 2.3 調査結果

図 2.3(1)に元宇品海域の調査結果を示す。図より水深 1m 位までの基質性状は、岩盤・岩になっておりネザシハネモ・アナアオサ・クロアワビなどの生物が確認された。水深 1m から 2m の基質状況は岩が主体となっており、ミルやホンダワラ類の株などが見られた。水深 2m から 3m の基質性状は、砂になっていて藻類などの生物は見られなかった。一方で、元宇品海域潮下帯にわずかに分布する岩盤において、クロアワビを数個体確認した。図 2.3(2)に示すように、クロアワビは岩のくぼみに隠れている状況であり、このことから、アワビが生息する条件としてこのような隠れ場としての窪みが必要と推測される。

図 2.3(3)に大カクマ島海域の調査結果を示す。図より水深 3m 位までの基質性状は、岩盤・岩になっておりヒジキ・ウミウチワなど多数の生物が確認された。水深 3m 以降からは、急に水深が深くなっていった。水深 4m から 6m の基質性状は、砂が主体で岩が点在していた。ホンダワラ類の株が確認された。大カクマ島海域では、生物多様性が高く、特に食物連鎖の上位に位置するようなサザエの分布量が多くなっており、水環境は良好であった。ただし、クロアワビは見られなかった。サザエとクロアワビはほぼ同じ環境に生息しており、本来なら、クロアワビも相応に分布しているはずである。その原因として、9 月に漁師がクロアワビを捕獲したことが大きな要因と考えられる。

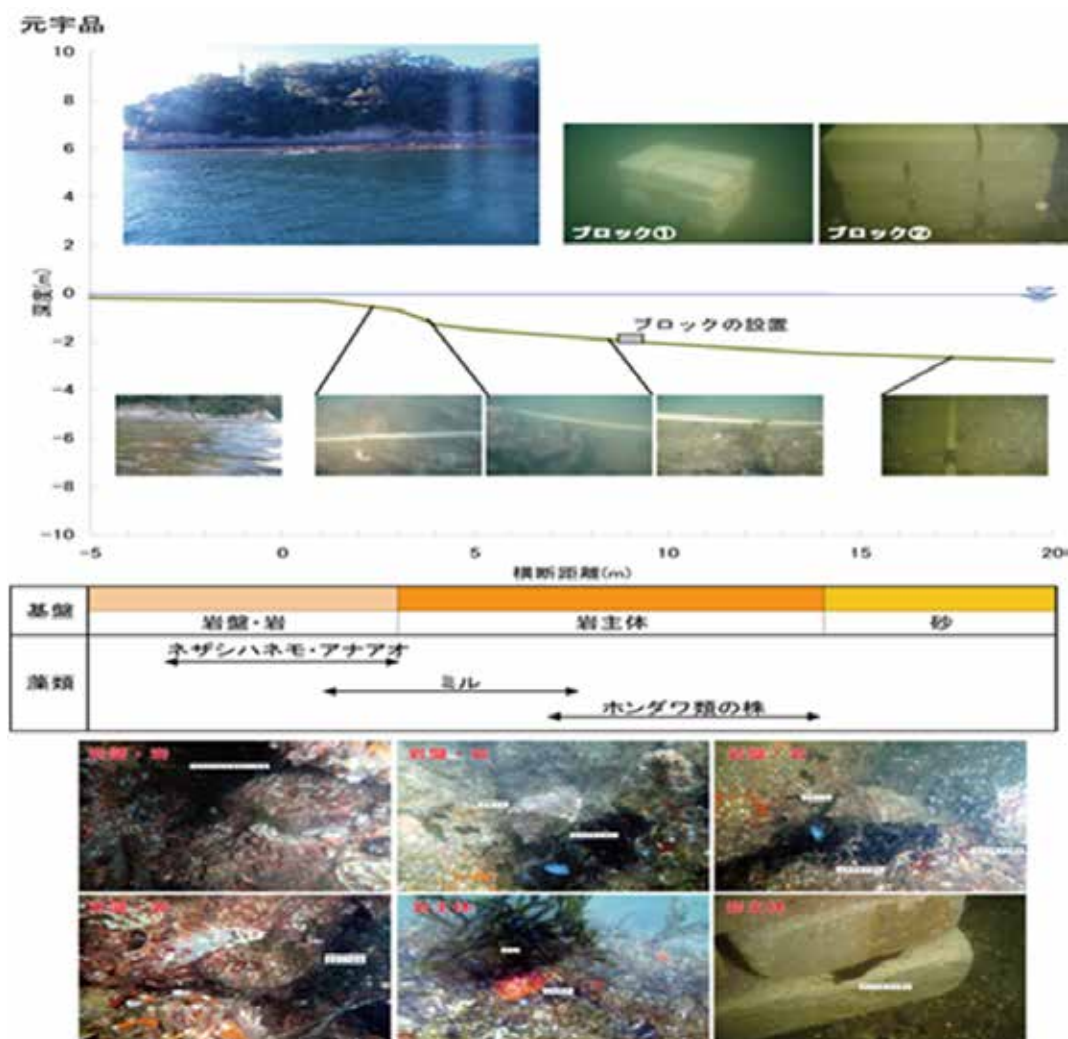


図 2.3(1) 広島港元宇品地区海岸の調査結果

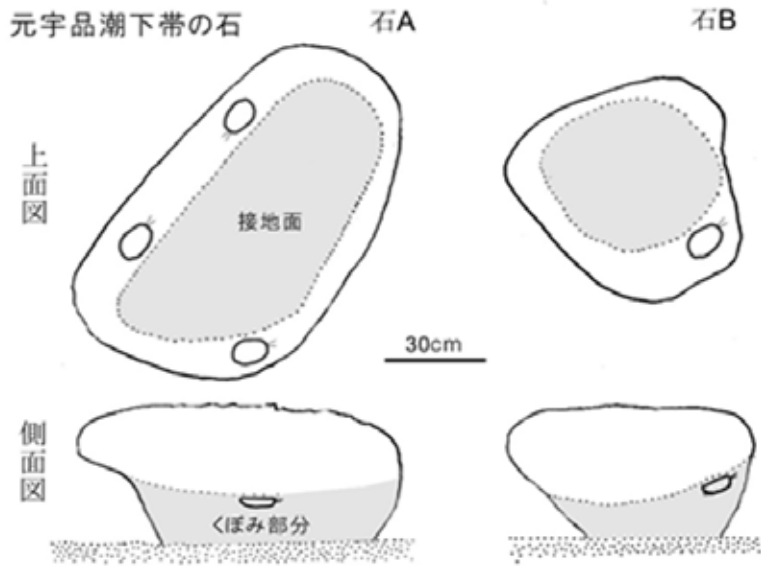


図 2.3(2) 広島港元宇品地区海岸におけるクローアビ確認位置概略図

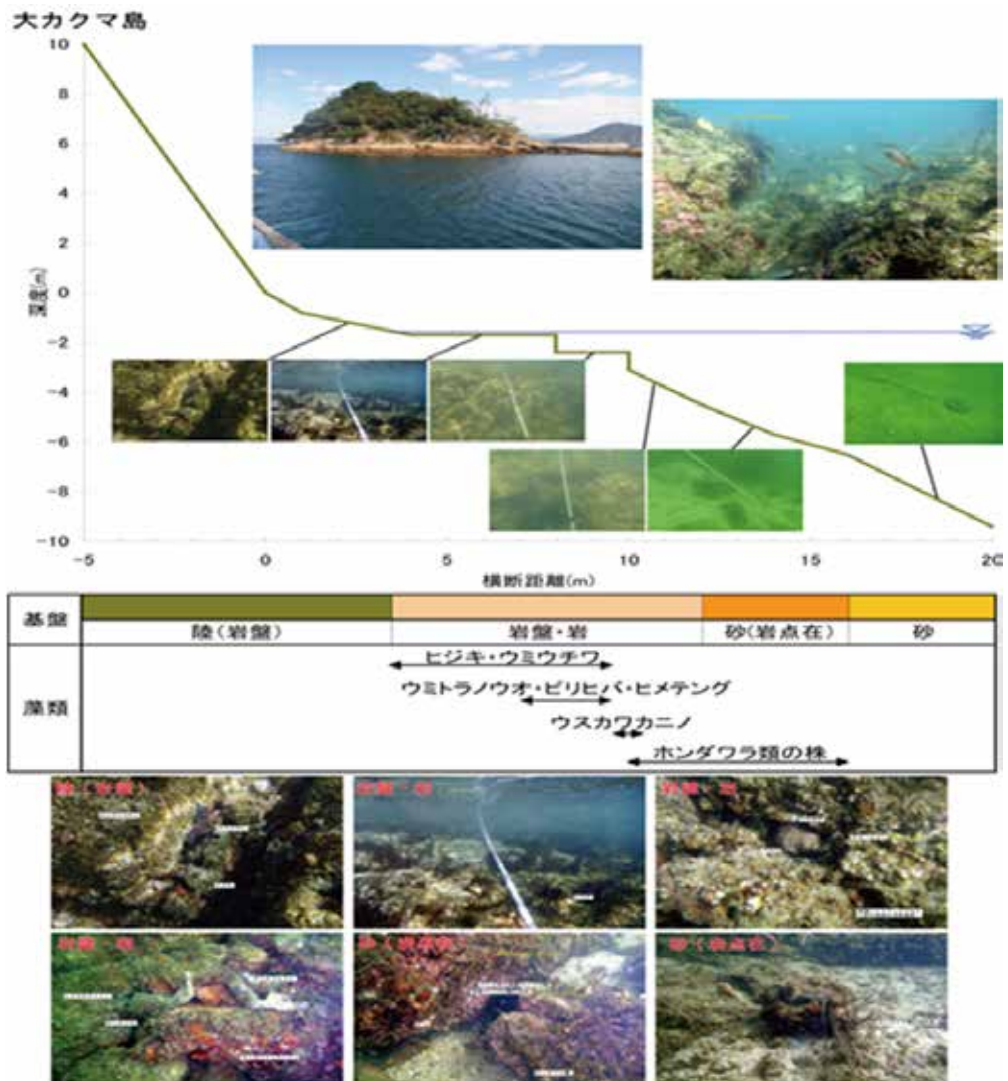


図 2.3(3) 広島港大カクマ地区海岸の調査結果

### 3. 生物基盤構造物を用いたアワビの餌場・生息場創出効果の検証

#### 3.1 生物基盤構造物の仕様

アワビの生息基盤創出を目的に、図 3.1 に示す生物基盤構造物を考案した。構造物は鉄鋼スラグ水和固化体にて製作し、縦：500mm×横：200mm×高さ：200mmとした。構造物の特徴として、アワビの生息場として楔状の狭小空間を設け、表面を研磨することでアワビの生息に適した構造物形状・性状を創出した。また、構造物表面を粗状とすることで海藻の着生を促す餌場機能を備えた。また、上面はポーラス構造とした構造物も製作し、表面積を大きくすることで海藻胞子が着生しやすい構造を期待した。



図 3.1 生物基盤構造物

#### 3.2 広島港内におけるアワビの生息条件の把握

##### (1) 調査概要

水産有用種であるアワビを環境資源の指標とし、広島港元宇品地区のマリーナ内に新しい生物生息基盤を設置することで当該資源のより良い生息環境創出の可能性について確認した。

ここでは、広島港元宇品地区において、アワビが最適に生息できる水深の選定を目的に水質調査を実施した。調査期間は平成 25 年 3 月～11 月の 9 カ月間とし、図 3.2 に示すような調査地点 St.1 を設定し、当該地点における水質の鉛直分布を計測した。調査方法は、図中に示す多項目水質計を用いて、各地点の海面下-0.5m から着底までの水深に対し、1m 毎の水温、塩分、DO、pH、濁度、chl.a を計測した。

また、当該域に設置する生物生息基盤にアワビの餌となる大型海藻の着生がするためには、波浪による適度な攪乱が必要となることから、石膏球を用いたマリーナ内の波浪場の攪乱評価を実施した。その結果より、生物生息基盤の最適設置位置の選定を行った。



図 3.2 調査地点および調査機器

## (2)広島港内の水質経時変化調査

図 3.3 にアワビの水質耐性に最も大きな影響を与える水温、塩分、DO の調査結果を示す。なお、図より水温は、海面下-4.0m 以深の底層では 10℃～26℃の幅で変化し、アワビの耐性の範囲に収まる値を得た。しかし、海面下-3.0m までの表層では、夏場に、上限である 27℃を超える場が形成されることが明らかとなった。

塩分は、当該域が太田川河口域の影響を受ける場所であり、夏場の大規模出水時に一時的に表層の値が 20 以下となることがあるものの、全期間を通じて、ほぼ生息に影響のない値の範囲に収まる結果を得ている。

DO は、8 月～9 月にかけて海面下-4.0m 以深の底層付近で底泥の酸素消費の影響を強く受けることから、生物生息の下限値である 3.5mg/l 以下の場が形成されることが明らかとなった。

上記の調査結果から、アワビの水質耐性である 10℃～27℃と調査結果を照らし合わせると、夏場には-3.0m で 27℃まで上がることから-3.0m より下の水深帯で生息するのが最適であるといえる。次に塩分の調査結果から視ると、水深-1.5m で塩分耐性である 20 を下回っているがこれより下の層では生息が可能となる。最後に溶存酸素濃度 (DO) の調査結果から、生物が生息できる最低限の酸素量は 3.5 mg/l である。この値を下回る水深は St.1 では水深約-4.5m となり、-4.5m より下の層では生息はできないことが分かる。

これらの 3 つの調査結果とアワビの水質耐性から、当該水域におけるアワビの生息に最適な水深は水温耐性の-3.0m 以下、生物が生息するための最低限の酸素量から視た-4.5m 以上である水深-4.0m が望ましいという結果を得ることができた。

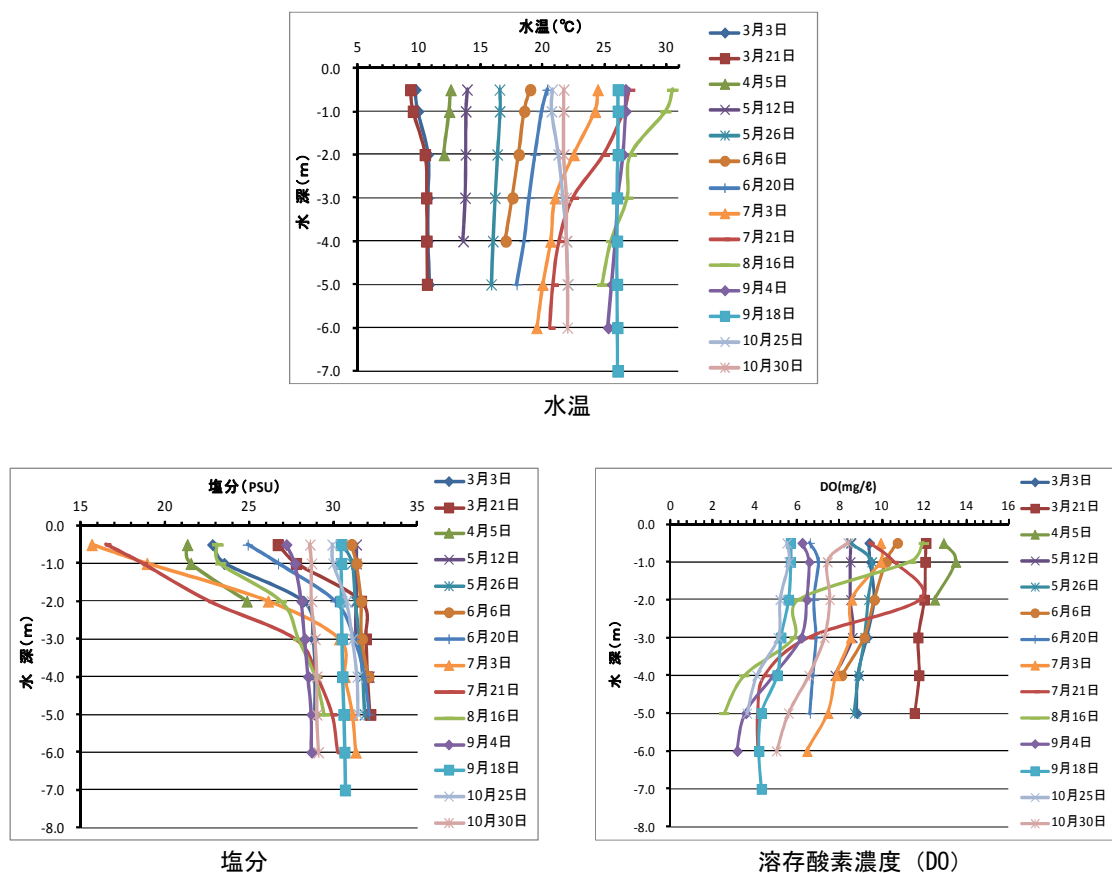


図 3.3 水質調査結果 (平成 25 年 3 月～11 月)

### (3)波浪場の攪乱評価に向けた室内予備実験

生物生息基盤の最適設置条件の設定に向けて、波浪の攪乱規模の評価指標が必要となるため、室内予備実験により石膏球を用いた流速の評価指標を作成した。なお、石膏球は小松<sup>1)</sup>の方法を参考に作成した。実験はまず、石膏球の初期乾燥重量を計測し、一定時間水道水に浸漬させた後に、図 3.4 に示すスターラーで流速値を調整した水槽にて流速と石膏球乾燥重量の変化の関係を評価した。ここで水槽の流速値は、サーマル式微流速計を用いて 1 cm/秒、3 cm/秒、5cm/秒を設定した。設定した各流速下で石膏球を 24 時間実験水槽に沈設し、引き上げた後に 5 日間乾燥させ、重量を計測することで設定流速と石膏球乾燥重量の変化の関係を求めた。

#### ①実験水槽における実験流速値の変動

設定した水槽内の設定流速値は、それぞれ 1.11cm/秒、2.74cm/秒、4.83cm/秒であった。この値は、設定値に対して小さいもので 0.11 cm/秒程度、大きいもので 0.26 cm/秒程度の変動に収束した値であり、設定値を反映した有効な値であると考ええる。

#### ②流速値と石膏球の乾燥重量との関係

図 3.5 に上月ら<sup>2)</sup>の算定手法に基づいて石膏球を用いた流速値の算定を行い、実験流速値との比較を行った結果を示す。図より、実験流速に対する計算流速は検量線の傾きが小さく、また y 切片が 0.88cm/秒となる値を得た。これは、使用した石膏の質や作成時の室内環境が影響したと考えられる。よって、ここでは式(1)に示すように、上月らの算定式に乾燥重量の補正係数( $O_1$ ,  $O_2$ )や実験流速に対する算定流速の傾きを補正するための補正係数( $k$ )を追記した。ここに、 $O_1=1.055$ ,  $O_2=1.000$ ,  $k=1.98$ を定めることで流速値と石膏球乾燥重量の関係を求め、図中に示す改良式より導いた検量線を用いて波浪の攪乱を計測する。

$$V = \left\{ 1 - \left( \frac{W_2 \times O_2}{W_1 \times O_1} \right)^{1-k} \right\} / \{ (1-k)\beta\tau \} - \alpha/\beta \quad (1)$$

$$\alpha = (-1396 + 52.20S + 290.8T) \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\beta = (2090 + 69.05S + 130.4T) \times 10^{-6} \quad (3)$$

ここで、

$W_1$  : 初期乾燥重量(g),       $W_2$  : 設置後乾燥重量(g)

$\tau$  : 設置時間(h),       $T$  : 水温(°C),       $S$  : 塩分(PSU)

とする。



図 3.4 石膏球流速検量水槽実験

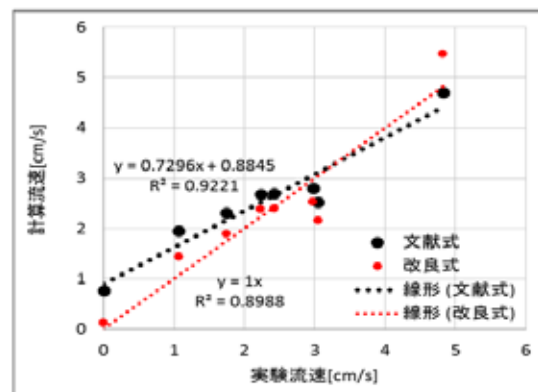


図 3.5 実験流速値と石膏球乾燥重量の関係

(4)生物基盤構造物設置場所の選定に向けた港内の水深および波浪場の調査

①水深分布調査

図 3.6 に広島港元宇品地区の低・未利用マリーナにおける水深調査測点および、その結果を示す。調査は当該マリーナにて、図の●印に示す水深の測点を設定し、レッドロープを用いて水深の計測を行った。調査の結果、図に示す水深分布が得られ、アワビの生息場として成立する最適水深 3~4m は、マリーナ奥部および北部に分布していることが示された。

②石膏球を用いた波浪場調査

石膏球を用いた波当たり調査は、2014年の7月22日~23日、12月19日~20日の計2回実施した。調査は、石膏球乾燥重量を計測した後、現地で石膏球を一定時間水道水に浸漬させ、コンクリートブロックに装着した後、水深分布調査より選定した図中に示す St.1~St.6 の設置場所へ沈設した。石膏球の引き上げは沈設した時間から24時間経過後に行った。また、石膏球の乾燥期間は5日間設け、乾燥後に重量を計測した。前述の式(1)で定めた算定法を用いて、マリーナ内における波浪攪乱にて生じる流速を求めた結果を図 3.7 に示す。図より、石膏球を用いた計測により得られた全体の流速は、St.1~St.5 で 2.0cm/秒~3.6cm/秒、St.6 では 3.5cm/秒~5.3cm/秒の値を示した。この値より、攪乱規模の大きい St.6 は、アワビの餌となる大型海藻の着生に有効であると考えられ、生物生息基盤の設置場所に適していることが推測される。

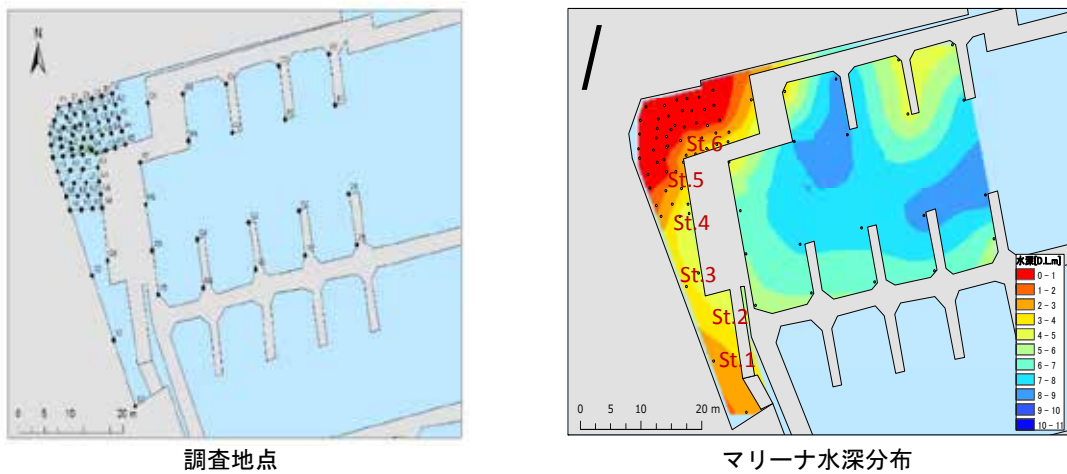


図 3.6 マリーナ水深調査地点および水深分布図（石膏球設置場所を記載）

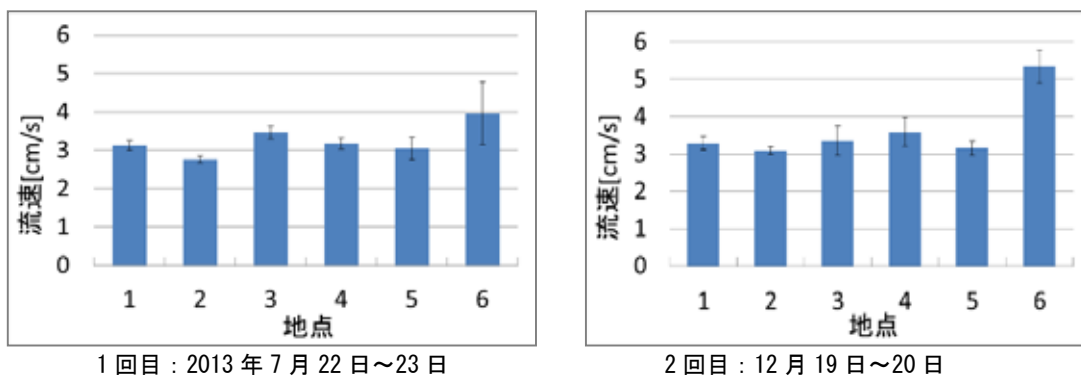


図 3.7 マリーナにおける波浪攪乱による地点平均流速計測結果



### 3.3 生物生息基盤を用いた餌場創出効果の検証

#### (1) 実験概要

アワビの餌となる大型海藻の着生状況を把握することを目的に、広島港元宇品地区のマリーナに生物生息基盤構造物を設置し、大型海藻の着生状況の追跡調査を行うことで、構造物設置によるアワビの餌場創出効果について検証した。

ここでは、2014年11月26日～2015年1月8日に調査を実施し、前掲の図3.1に示すポーラス型の生物生息基盤(基盤1)と標準型の生物生息基盤(基盤2)について、基盤構造の違いによる大型海藻の成長量の変化を比較評価する目的で調査を行った。調査はアワビの生息に適した水深を有し、前述の波浪場攪乱調査にて最も大きな攪乱を示した図3.6に示すSt.6に基盤1と基盤2を設置し、構造物に着生する大型海藻の葉長、湿重量を計測し、その経時変化量を求めることで餌場創出効果を評価した。

また、近傍の護岸に着生した大型海藻の葉長の変化も比較評価し、当該域に生物生息基盤を設置する効果についても評価した。

#### (2) 生物生息基盤への大型海藻の着生状況

図3.8に生物基盤構造物への海藻の着生状況を示す。また、図3.9に基盤1および基盤2に着生した大型海藻の生長量(葉長)の経時変化を示す。基盤2は当初129mmの大型海藻が241mmへと成長する結果が得られた。基盤1は当初193mmの大型海藻が、設置後32日間経過した1月8日には652mmに成長し、基盤2より基盤1が大型海藻の成長速度が速いことが多いことが確認された。基盤1の着生量、増加量が多い要因として、基盤1は海藻着生面をポーラス構造としたことで着生面積が基盤2に比較し大きいこと、浮泥等の堆積物が溜まりにくい構造となったことが考えられる。

図3.10に示す周辺の護岸に着生した海藻の葉長の経時変化と比較しても、生物基盤構造物に着生する大型海藻の量、成長量がともに大きい傾向が確認され、その設置効果がアワビの餌場創出に大きく寄与することが示唆された。



図 3.8 生物基盤構造物への海藻の着生状況

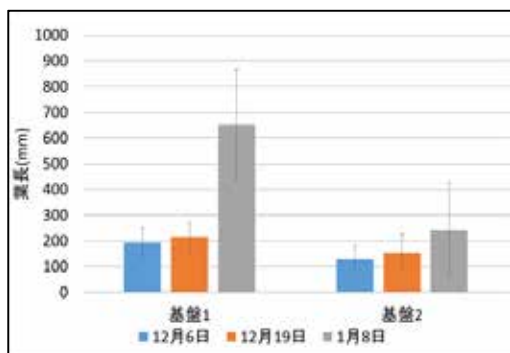


図 3.9 構造物に着生した大型海藻の大きさの経時変化

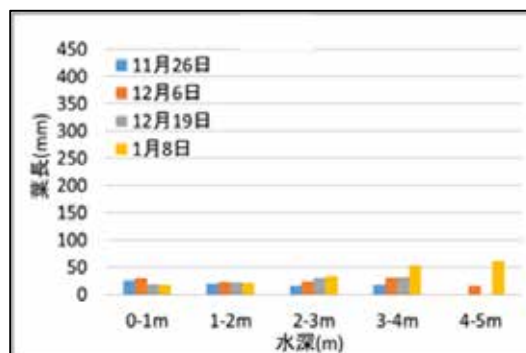


図 3.10 周辺護岸に着生した水深別大型海藻の大きさ

### 3.4 生物基盤構造物を用いたアワビ生息場創出効果

#### (1) 成育実験概要

前述の基盤2構造物に人為的にアワビを着生させることで、その環境下におけるアワビの成長量や生存率を計測することでその成育の可能性を評価した。

実験装置は図 3.11 に示す様に、縦 600mm×横 300mm×高さ 300mm の FRP 製の籠に基盤 2 を固定設置しアワビの生息基盤とした。装置は前掲の図 3.6 に示す St.6 (D.L.-3.0 m) に 3 基設置した。また、愛媛県栽培資源研究所より入手したアワビの内、活性が高い 30 個体を選定し、3 つの実験装置に 10 個に分けて設置した後、海中に浸漬した。実験は平成 26 年 11 月 20 日に開始し、約 2 か月間アワビの生存個体数、殻長、重量を計測した。

#### (2) 生物生息基盤構造物を用いたアワビ生育効果

図3.12にアワビ成育実験結果を示す。図より、アワビの生存個体数は2回目の計測時において大幅に減少する結果を得ており、実験期間全体の生存率は約40%と低い値を示した。これはアワビ殻長・重量の初期計測時に長時間空中に曝し計測したことで、アワビに大きなストレスを与えたことが原因と考えられる。2回目以降の計測においては、アワビにストレスを与えないよう配慮したことで、大幅な死亡は確認されなくなった。その結果、以降の生存率は66%と高い値を得た。図3.13に示すアワビの成長量の経時変化は、11月19日～1月20日にかけて徐々に重量、殻長ともに増加しており、殻長が2カ月で約2mmの成長を示し、重量が6.28g増加を示した。この値は平均的な成長の値より大きい値となっており、生物基盤構造物がアワビの生息として適していることが示された。



図 3.11 アワビ成育実験装置

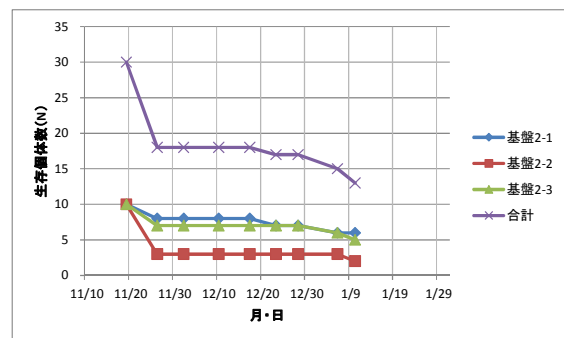


図 3.12 アワビ個体数の経時変化

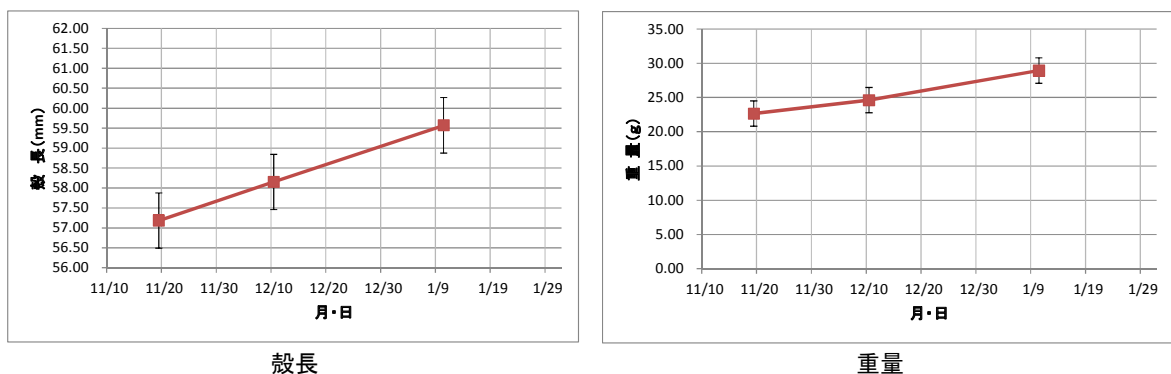


図 3.13 アワビ成長量の経時変化

#### 4. まとめ

瀬戸内海に生息する多様な生物資源を『環境資源』として位置づけ、当該資源の創出に向けた技術として『鉄鋼スラグ水和固化体を用いた生物基盤構造物』を考案し、当該技術の最適形状や適用方法の構築について基礎的な研究を実施した。

まず、広島港内における環境資源として水産有用種のアワビを選定し、その生息条件の抽出を目的とした調査を実施した結果、都市臨海部の元宇品地区であっても水深3m～4mの岩盤等の基質の場所ではクロアワビやサザエといった水産有用種が多数確認され、水質が多少悪くても生物の餌場や棲家等の生息環境を整えば、アワビのような水産有用種も十分に生息できる場であることが示された。

次に、アワビの生息水深選定調査を実施し、水温、塩分、DOの調査結果からアワビの生息場として海面下-3.0～-4.0m地点が最適であるとの結果を得た。また、餌場創出実験では、波当たりの攪乱条件を満たしている場所に生物生息基盤を設置することで、大型海藻（ワカメ等）が着生し、アワビの餌場が創出可能であることが確認された。アワビの成育実験では、港湾域でも生物基盤構造物を設置することで、生息場と餌場が確保されれば、持続的な生息が可能であることが示された。

今後は、対象となる水産有用種の生息場の条件と合わせて、生息基盤の仕様（材質・形状）を検討することが必要と考える。そのためには、設置条件の設定や、基盤構造物の材質や形状を変えることで、より効率的・効果的な海藻の着生を可能とする生物基盤構造物の仕様選定を実施し、今後も増加するであろう低・未利用港湾を環境資源の育成の場として活用する技術の確立を目指す。

#### 参考文献

- 1)小松輝久：石膏球による時間平均流の強さ測定方法の改良とその観測例，月刊海洋，Vol.24，No.8，pp.504-509，1992.
- 2)上月康則，村上仁士，戸高英二，米田耕造，小西哲也：海岸構造物建設に伴う平均流速の変化と底生生物の応答について，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部，Vol.54，pp.244-245，1999.
- 3)岡市友利・小森星児・中西弘：瀬戸内海の生物資源と環境—その将来のために，恒星社厚生閣