

鉄鋼スラグを用いて造成された海草藻場の炭素循環に関する基礎的研究

研究代表者 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授 西村 修

1. 緒言

アマモやコアマモなどの海草類からなる海草藻場は、生物の生息の場として重要であるだけでなく、海草藻場に生息する生物の摂食に伴う有機物の除去といった水質浄化機能も有している。さらには、海草藻場によって形成される生態系が多くの炭素をブルーカーボンとして固定する¹⁾ため、大気中からの炭素除去機能も担っている。しかし、埋め立てなどにより海草藻場は全国的に減少しているため、人工的な浅場を造成し、海草藻場を修復する取組が行われている。海草藻場の造成には大量の砂が必要となるが、天然砂の採取は採取地の環境破壊を招く恐れがあるため、天然砂の使用は避けるべきである。そこで、安価かつ大量に入手可能な鉄鋼スラグが着目されている。海草藻場造成における鉄鋼スラグの有用性は、アマモやベントスの移入・定着状況を検討した既往研究によって評価されている^{2,3)}が、さらに海草藻場生態系の再生に対する鉄鋼スラグの評価を進める必要がある。特に、海草藻場生態系は海草のみならず海草の葉上付着藻類や底生微細藻類を一次生産者とする系であり、複雑な食物網により炭素循環が行われる場であるが、海草藻場における炭素循環に着目した研究事例は少ない。そこで、本研究では、海草藻場生態系の再生における造成材料としての鉄鋼スラグを実海域で評価するとともに、自然条件下の海草藻場と近傍裸地において底生動物の食物網を解析し、海草藻場における炭素循環に関する基礎的検討を行った。

2. 海草藻場生態系の再生における造成材料としての鉄鋼スラグの評価

2-1 はじめに

松島湾は、東日本大震災によりアマモ場の面積は1/100、アカモク藻場の面積は1/8程度まで減少した⁴⁾。実験場所として選定した松島海岸付近（水深約2m）は震災前には大規模なアマモ場が形成されていたが、震災後に底質は貝片混じりの泥となり、海底表面には珪藻類が繁茂していた。事前の調査（100 m²: 50m×2m）でアマモは2箇所のみ確認され被度（海底の面積に対する海草の生育面積の割合、本研究では視覚により確認）も低かった。またアマモの生育密度は8本/0.25 m²(50×50cm)と低く、全長では10~65cm（平均40cm）程度の個体であったことから、震災前から生育していた個体の残存と考え

られた。

これらの結果は、松島湾全体の傾向を代表しており、震災・津波による底質のダメージが大きく、特に地下茎で増殖するアマモ場の被害の大きさを表しているものと考えられた。この場所を選定しスラグを用いたアマモ場修復の可能性を検討した。

2-2 実験方法

使用するスラグ資材は、マリンスターンなどであり。資材をセットした後、長期間にわたってそれらの直上水（資材面から 5cm 上）をサンプリングするためのチューブを基質面直上 5cm に取り付けた（表 1）。

表 1 試験区と投入資材の種類

海草	試験区	スラグ種類	粒径・比重	予定投入量	備考
アマモ	1	マリンスターン(10%)	30-13mm・1.8	34kg	底質土へ混入
	2	天然石(10%)	30-13mm・1.8	34kg	底質土へ混入
	3	なし(対照区)			

試験基質を投入後、海中で自然養生し、アマモの移植を実施した。アマモの移植方法は播種法と苗の植え付け法が実用化されているが、本試験区では、底泥が不安定で、播種法では流出の恐れがあり、苗植え付け法を採用した。

2-3 実験結果

ケース1(アマモ区 マリンスターン 10%)

試験区設置、アマモ移植後のモニタリング結果を以下に示す。



平成 24 年 3 月 10 日

試験ポット設置直後。濁り発生。直上水サンプリング用チューブが見える



平成 24 年 5 月 17 日

移植直前。底泥面にマリンスターンが埋没している。



平成 24 年 5 月 18 日

移植翌日.

しっかり活着している.



平成 24 年 6 月 17 日

移植後 1 ヶ月. 正常に成長.

巻き貝などほかの生物の蛸集も見られる.



平成 24 年 7 月 15 日

移植後 1 ヶ月

水温が高くなり生育衰退が見られるもの
の正常に成長 (平均草丈 55cm)

巻き貝などほかの生物の蛸集も見られる.

ケース2(アマモ区 天然石 10%)



平成 24 年 3 月 10 日

試験ポット設置直後. 濁り発生.

直上水サンプリング用チューブが見える.



平成 24 年 5 月 17 日

移植直前の底泥面. 天然石が底泥面に確認
できる.



平成 24 年 5 月 18 日

移植翌日．しっかり活着している．



平成 24 年 6 月 17 日

移植後 1 ヶ月．正常に成長．巻き貝などほかの生物の蛸集も見られる．



平成 24 年 7 月 15 日

移植後 1 ヶ月

水温が高くなり生育衰退が見られるものの正常に成長（平均草丈 60cm）

人工石試験区と差異は認められない

ケース3(アマモ区 対照 混入材無し)



平成 24 年 3 月 10 日

作業により濁りが発生．
ほとんど視界がきかず．



平成 24 年 5 月 17 日

移植直前の底泥面



平成 24 年 5 月 18 日
移植翌日．しっかり活着している



平成 24 年 6 月 17 日
移植後 1 ヶ月．正常に成長．
濁りが激しい



平成 24 年 7 月 15 日
移植後 1 ヶ月
水温が高くなり生育衰退が見られるもの
の正常に成長（平均草丈 60cm）
濁りが激しい．

水質調査結果

水質のサンプリング調査は，試験区ごとに底泥上 5cm のところにセットしたサンプリングチューブから吸引したサンプルを分析した．一連の水質調査の結果は，スラグ製品をセットしたものと何もセットしていないブランクとでは特に差異は認められず，スラグ直上の水質に影響は認められなかった（表 2）．

表 2 水質調査結果

調査日：平成24年8月27日

調査項目 試験区・スラグ種類		pH	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	TOC (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
ケース1	マリンストーン（10%）	8.0	0.34	0.077	0.05未満	0.01未満	0.005未満	3.0	0.030
ケース2	天然石（10%）	8.0	0.38	0.086	0.05未満	0.01未満	0.005未満	3.8	0.029
ケース3	なし（対照区）	8.0	0.59	0.10	0.05未満	0.01未満	0.005未満	5.4	0.021

底質調査結果

調査結果は表 3 に示すとおり，対照区と試験区に違いは認められなかった．

表 3 底質調査結果

試験項目 試験区・スラグ種類等	T-N (mg/g)	T-P (mg/g)	S (mg/g)	C (mg/g)
ケース 1 マリンストーン (5%)	2.9	0.39	0.16	28
ケース 2 天然石 (10%)	3.6	0.40	0.24	32
ケース 3 なし (対照区)	3.2	0.39	0.21	31

2-4 まとめ

アマモはマリンストーンを基質として正常な活着・成長が認められた。また、泥面直上 (5cm) での水質には、周辺水域とほとんど差違が認められず、水質環境面へのスラグの影響はなかった。

3. コアマモ場と近傍裸地における底生動物の食物網解析

3-1 はじめに

海草藻場の炭素循環においては底生動物が重要な役割を演じると想定されることから、基礎的研究として底生動物の食物網解析を行った。S. Y. Lee, et al.⁵⁾ は人工海草群落を用いた実験で、表層のベントス種の豊富さやバイオマスの構成は人工海草群落と関係があり、それは3ヶ月現場で観測されたこと、表在ベントスの全体的な豊富さは高密度草長系で砂系よりも高かったことなどから、コアマモ群落における物理的な林冠構造が表在ベントスの多様性を構成しており、その理由として、林冠構造によるデトリタストラップ機能が餌料を供給したためと推察している。一方、筆者らのこれまでの研究⁶⁾ では、多毛類のうちスピオ科の個体数が冬に増加したことから、夏季から冬季にかけての安定かつ豊富な餌料供給が多毛類の豊富化を促進させたと推測される。これらの既往研究は、いずれも底生動物の増加メカニズムとして餌料供給を挙げているが、実際にコアマモ場の底生動物の餌源や食物網を解析した例はない。そこで本研究では、炭素・窒素安定同位体比を用いて、コアマモ場と近傍裸地の底生動物食物網を解析した。

3-2 実験方法

試料採取

宮城県松島湾中央部に位置する桂島 (38° 20' 7.4N, 141° 5' 14.7W) には干潟があり、コアマモがパッチ状に群生している。この調査地で2006年6月、2009年6月と8月に

底生動物の採取を行い、 -20°C の冷凍庫で分析まで保存した。

炭素・窒素安定同位体比分析

-20°C で冷凍されていた底生動物を試料として炭素と窒素の安定同位体分析をガスクロマトグラフ質量分析計 (DELTAplus, Finnigan MAT, 精度 $\pm 0.01\%$) を使用して行った。国際標準試料としては炭素が PDB, 窒素は大気中窒素を用いられているが, ここでは常用の標準試料としてヒスチジン (Histidine, 商光通商株式会社) を用いて分析を行った。分析誤差は $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ とともに $\pm 0.2\%$ である。

3-3 実験結果

コアモ場における底生動物の餌源解析

底生動物が摂食していると考えられる POM と SOM, そしてコアモと底生動物の炭素・窒素安定同位体比を図 1 に示した。図より, 底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ 値 POM とコアモの間に存在していることが分かる。 $\delta^{13}\text{C}$ は栄養段階が 1 増加するにあたり 1% 増加することが経験的に明らかになっており, 食物網解析の際によく用いられている⁷⁾。コアモを摂食していれば, コアモの $\delta^{13}\text{C}$ ($-11.0 \pm 0.8\%$) よりも 1% 高い値を持つと想定されるが, コアモの $\delta^{13}\text{C}$ よりも高い値を持つ底生動物は存在しないことが明らかとなった。このことから, 今回検討した底生動物はコアモのみを餌としていないことが明らかとなった。同様に, POM の $\delta^{13}\text{C}$ ($-22.1 \pm 0.8\%$) よりも 1% 高い値を持つ底生動物も存在しなかった。懸濁物食者であるカガミガイの $\delta^{13}\text{C}$ ($-18.1 \pm 0.3\%$) は POM よりも高い $\delta^{13}\text{C}$ を持つことが明らかとなり, カガミガイは POM に含まれる有機物を全て同化しているのではないことが示唆された。POM に含まれる有機物としては渦鞭毛藻類と珪藻類, 海草が想定され, 全国的な渦鞭毛藻類の $\delta^{13}\text{C}$ の平均値は $-21.1 \pm 2.3\%$ と低いが, 珪藻類の平均値は $-17.6 \pm 3.2\%$ である。このことから, カガミガイは POM に含まれる有機物のうち, 渦鞭毛藻類由来の有機物よりも珪藻類や海草由来の有機物を多く同化していると考えられた。

内在性の底生動物であるキサゴとゴカイは, 底質内部 SOM の摂食が考えられる。キサゴ ($-16.5 \pm 1.3\%$), ゴカイ科 ($-14.4 \pm 0.5\%$) とともに, 底質内部の SOM ($-17.4 \pm 2.7\%$) よりも高い $\delta^{13}\text{C}$ 値をもっていることが明らかとなった。キサゴは底質内部の SOM よりも約 1% 高い値を持つことから, 内部の SOM を全て同化している可能性が示された。一方で, ゴカイ科は底質内部の SOM よりも 1% 以上高い値を持っていたことから, ゴカイ科は底質内部の SOM を全て同化しているのではないと示唆された。底質内部 SOM には,

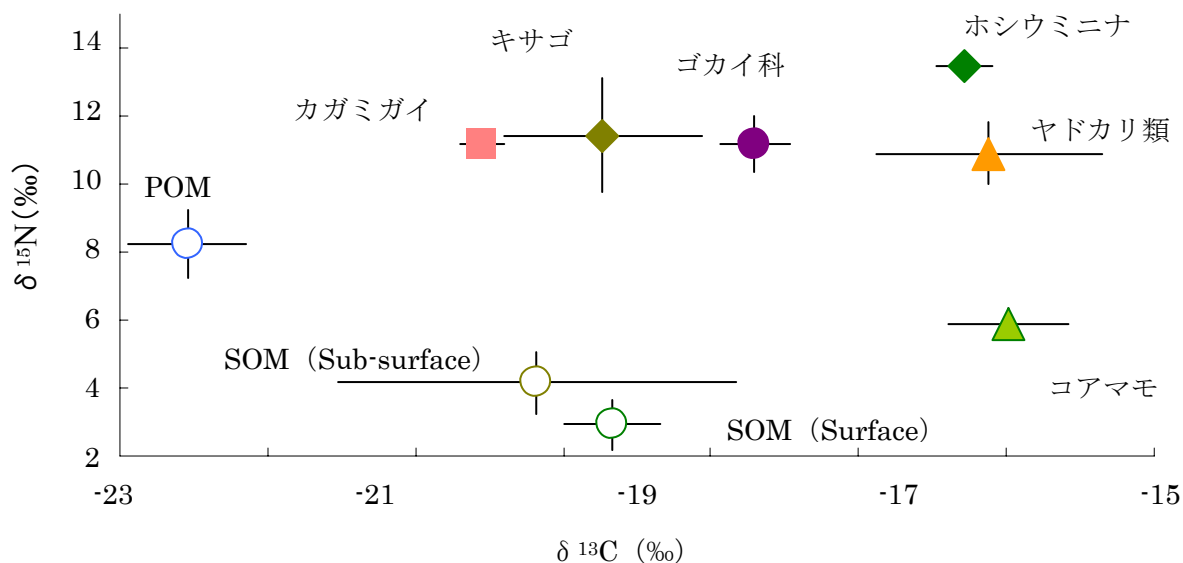


図1 コアマモ場における底生動物とその餌源の安定同位体比マップ（バーは標準偏差）

渦鞭毛藻類，珪藻類，コアマモ由来の有機物が存在していることと想定されるが，これら一次生産者の中で底質内部 SOM よりも高い $\delta^{13}\text{C}$ を持っているのはコアマモの $-11.0 \pm 0.8\text{‰}$ だけであることから，ゴカイ科は SOM のなかでもコアマモを多く同化している可能性が示された．

一方で，表在性のホソウミニナとヤドカリ類は，底質表層の SOM の摂食が考えられたが，ホソウミニナ ($-11.6 \pm 0.4\text{‰}$)，ヤドカリ類 ($-11.2 \pm 1.5\text{‰}$) とともに，底質表層の SOM ($-16.3 \pm 0.7\text{‰}$) よりも 1‰以上高い値を持つことが明らかとなった．底質表層の SOM に含まれる有機物の生産者の中で，底質表層 SOM よりも高い $\delta^{13}\text{C}$ を持つのはコアマモだけであることから，ホソウミニナとヤドカリ類は底質表層の SOM のなかでも，コアマモを多く摂食・同化している可能性が示された．

一方， $\delta^{15}\text{N}$ は栄養段階の増加に伴って 3.4‰上昇することが知られているが，栄養段階を算出する際の基準生物として懸濁物濾過食性の二枚貝が用いられている．そこで，今回用いた底生動物のなかでもカガミガイは懸濁物濾過食性であると考えられるため，カガミガイの $\delta^{15}\text{N}$ ($11.2 \pm 0.25\text{‰}$) を栄養段階 2，また，各栄養段階の $\delta^{15}\text{N}$ の差を 3.4‰とそれぞれ仮定し，各生物の栄養段階を算出した．

この結果，ゴカイ科 (TL=2.0)，キサゴ (2.1)，ヤドカリ類 (1.9) はカガミガイ同様に TL=2 であると考えられたが，ホソウミニナの TL は 2.7 と高く，栄養段階がこれらの生

物よりも 1 高い可能性が示唆された。このことから、ホソウミニナは他底生動物を餌としている可能性が考えられた。しかしながら、既往研究から、ウミニナ科の諸種は、微細藻食とデトリタス食を兼ねていることが知られている⁸⁾。よって、ホソウミニナの $\delta^{15}\text{N}$ の増加は他生物を捕食したためであるとは考え難い。他に $\delta^{15}\text{N}$ を上昇させる要因としては、バクテリアによる作用が考えられる。バクテリアによる有機物分解は $\delta^{15}\text{N}$ を上昇させることが知られており、菊地と栗原⁹⁾ は維管束植物のデトリタスは、分解は遅いが加齢（一定時間の放置）によって、微生物体などの動物にとって利用可能な有機物に変換され、その栄養価は上昇すると考察している。これらのことから、ホソウミニナの持つ高い $\delta^{15}\text{N}$ は、ホソウミニナがバクテリアやバクテリアによって分解された有機物を好む腐植食者である可能性を示唆していると考えられた。

近傍裸地における底生動物の餌源解析

近傍裸地における底生動物とその餌源の炭素・窒素安定同位体比を図 2 に示した。図からわかるように、底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ は POM や SOM (Surface) よりも高いことが明らかとなった。栄養段階の上昇に伴い $\delta^{13}\text{C}$ が 1‰増加することを用いて、底生動物の餌源を推定した。懸濁物食者であるカガミガイの $\delta^{13}\text{C}$ ($-18.0 \pm 0.3\text{‰}$) は POM ($-22.1 \pm 0.6\text{‰}$) よりも 1‰以上高いことが明らかとなり、コアマモ場同様にカガミガイは POM に含まれる有機物を全て同化しているのではないことが示唆され、渦鞭毛藻類由来の有機物よりも珪藻類や海草由来の有機物を多く同化していると考えられた。また、内在性の底生動物であるキサゴとゴカイ科は底質内部 SOM の摂食が考えられたが、キサゴ ($-17.1 \pm 0.2\text{‰}$)、

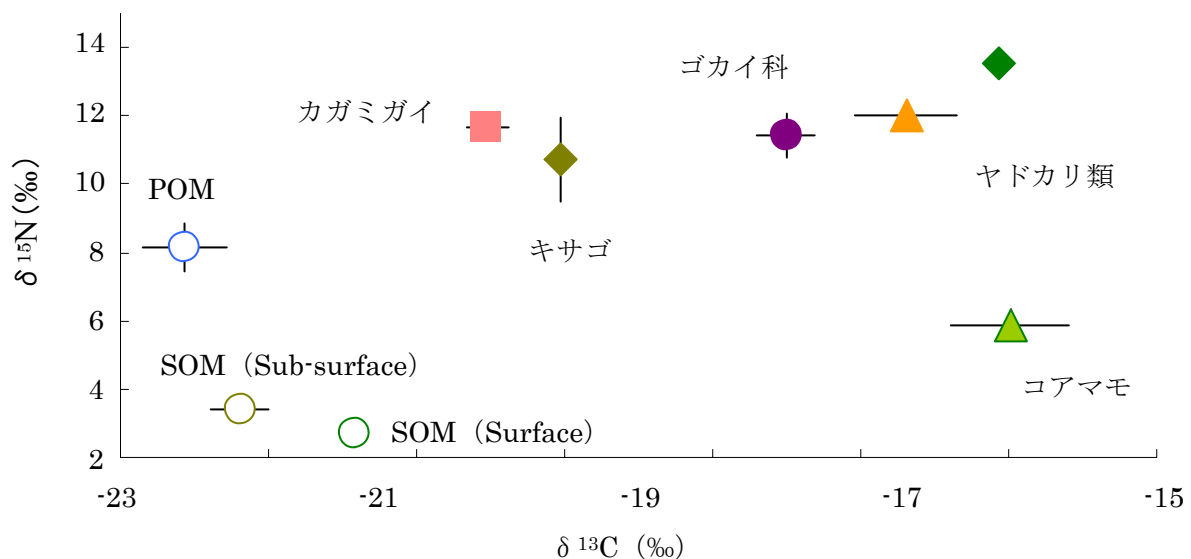


図 2 近傍裸地における底生動物とその餌源の安定同位体比マップ (バーは標準偏差)

ゴカイ科 ($-14.0 \pm 0.4\text{‰}$) とともに、底質内部の SOM ($-21.4 \pm 0.4\text{‰}$) より 1‰ 以上高い値をもっていた。同様に、ホソウミニナ ($-11.2 \pm 0.2\text{‰}$) とヤドカリ類 ($-12.4 \pm 0.7\text{‰}$) も、底質表層の SOM ($-19.8 \pm 0.1\text{‰}$) よりも 1‰ 以上高い値を持っていた。これらのことは、キサゴ、ゴカイ科、ホソウミニナそしてヤドカリ類が SOM に含まれる有機物を全て同化しているのではないことを示唆している。SOM 中に含まれる生産者の中で底質表層の SOM の $\delta 13\text{C}$ よりも高い値を持っているのは、底生微細藻類としての珪藻類 ($-17.6 \pm 3.2\text{‰}$) とコアマモ ($-11.0 \pm 0.8\text{‰}$) である。キサゴの $\delta 13\text{C}$ は珪藻類の値とほぼ同じであったが、ゴカイ科、ホソウミニナ、ヤドカリ類は、珪藻類よりも 1‰ 以上高い値を持っていた。珪藻類よりも高い値をもつ一次生産者がコアマモだけであることから、ゴカイ科、ホソウミニナ、ヤドカリ類は、近傍裸地においても、SOM 内部や表層に含まれる珪藻類やコアマモ由来の有機物を多く同化していると考えられた。一方、カガミガイの $\delta 15\text{N}$ ($11.6 \pm 0.3\text{‰}$) から各生物の栄養段階 (TL) を算出した。すると、コアマモ場同様に、ゴカイ科 (TL=1.9)、キサゴ (1.7)、ヤドカリ類 (2.1) はカガミガイ同様に TL=2 であると考えられたが、ホソウミニナ (2.6) は、コアマモ場同様に他底生動物よりも TL が高いことが明らかとなった。このことは、ホソウミニナが生息場所に関わらずバクテリアによって分解された有機物を好む腐植食者である可能性を示唆した。

3-4 まとめ

コアマモ場の影響を大きく受けていると考えられる生物群を参考に、ゴカイ科、ホソウミニナ、キサゴ、カガミガイ、ヤドカリ類を用いて、これらの餌源を明かにする目的で炭素・窒素安定同位体比を測定した。その結果、 $\delta 13\text{C}$ が生物間で異なることから、ゴカイ科、キサゴ、カガミガイ、そしてホソウミニナ、ヤドカリ類は生物ごとに同化物の組成が異なっていることが示唆された。しかしながら、どの底生動物もコアマモ場と近傍裸地で炭素・窒素安定同位体比に差はなく、生息場がコアマモ場でも近傍裸地でも各底生動物の同化している餌に差はないと考えられた。

また、底生動物が摂食していると考えられる POM や SOM のような様々な一次生産者由来の有機物が混合したものと、コアマモの炭素・窒素安定同位体比と比較検討した結果、今回検討した底生動物には、コアマモのみを餌としているものが存在しないことが明らかとなった。

4. 結論

アマモはマリンストーンを基質として正常な活着・成長が認められた。また、泥面直上(5cm)での水質には、周辺水域とほとんど差違が認められず、水質環境面へのスラグの影響はなかった。

一方、コアマモ場と近傍裸地の食物網を解析し、ゴカイは、コアマモ場・近傍裸地両方において、コアマモ地下部デトリタスを主要な餌として同化していると考えられた。よって、ゴカイ科にとってコアマモ場は索餌場として重要な意味を持っていると考えられ、コアマモ場でゴカイ科の個体数が多い理由は餌の豊富さによるものであると示唆された。また、表在性ベントスであるホソウミニナはコアマモ場・近傍裸地ともに、他底生動物よりもコアマモ由来有機物を同化していることが示された。一方で、珪藻類や渦鞭毛藻類の摂食・同化は他の底生動物と比較して少ないと考えられた。以上のことから、ホソウミニナはコアマモ場、近傍裸地において、底質表層に存在するコアマモ由来の有機物を主要な餌として摂食していると考えられ、コアマモ場由来の有機物が豊富なコアマモ場の表層底質は、ホソウミニナにとって重要な索餌場であることが示された。すなわち、海草藻場の存在は、炭素循環の活性化に極めて重要な役割を担うことが示唆された。

5. 謝辞

本研究は JFE21 世紀財団 2011 年度・技術研究助成の支援を受けて実施された。ここに記して感謝の意を表す。また共同研究者である佐々木久雄氏、野村宗弘氏、長濱祐美氏に御礼申し上げる。

6. 引用文献

1. C. Nellemann et al. (2009) Blue Carbon. UNEP, GRID-Arendal, www.grida.no.
2. JFE スチール株式会社 (2011) 海草藻場の造成方法及び海底での海草類の増殖方法, 特開 2011-4768A.
3. 鶴谷ら (2005) 海岸工学論文集, Vol.52, pp. 986-990.
4. 西村 (2013) 水環境学会誌, Vol.36 (A) ,No.2.
5. S.Y.Lee, C.W.Fong, R.S.S.Wu (2001) Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 259, 23-50.
6. 長濱祐美, 野村宗弘, 中野和典, 木村賢史, 西村 修 (2007) 土木学会論文集 G, 63(4),

233-240.

7. 富永修, 高井則之 (2008) 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態-アサリからクジラまで, 恒星社厚生閣.
8. 日本ベントス学会 (2003) 海洋ベントスの生態学, 東海大学出版会.
9. 栗原康編 (1988) 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会.