FFC 研究レポート

［沿岸生態系編］

海草への FFC 製品の効果を検証

沿岸の生態系に重要な役割を担う海草の生長を FFC テクノロジーが促進する可能性を科学的視点で検証します。

作成：赤塚植物園グループ 研究開発部

「赤塚 FFC の日」2024 記念セミナー版

＜INDEX>

FFC セラミックスのアマモ生長への効果検証（水槽実験）
天草市宮地浦湾でのアマモ育成試験
アマモ実生苗の光合成活性に対する FFC セラミックスの効果
FFC 製品のコアマモ生長への効果検証（水槽実験）
天草市宮地浦湾のコアマモ生育エリア調査

FFC セラミックスのアマモ生長への効果検証（水槽実験）

【背景】

広島県西明水産様の近くの海に広がるアマモ場

アマモは種子または地下茎の分岐によって繁殖する海草で、日本沿岸の砂泥域に広く分布する。このアマモの群落（以下、アマモ場）は、「海のゆりかご」と呼ばれ、様々な魚介類の稚育場や産卵場所の役割を持つ。また、赤潮の原因となる窒素やリンを吸収したり、吸収した二酸化炭素を長期間保持したり（ブルーカーボン）、地球環境改善の側面からも、アマモ場の重要性が注目されている。

広島県の西明水産様を代表例として、FFC 製品を使用された水産関連の事業者様の周辺海域では、アマモの生育が旺盛になったり、アマモ場が復活したり、といった事例をしばしば耳にする。

そこで、本実験では、FFC セラミックスがアマモの生長にどのような効果を及ぼすのか、水槽実験により検証した。

【方法】

三重県松阪市松名瀬海岸で採取したアマモ成熟株を、地下茎が 5 節、地上部の葉鞘の最上部から本葉が 1 cm となるように切りそろえた。ガラス製の水槽（60cm×30cm×36cm)にアマモ採取現場の底質約 10 L、海水 40 L を入れ、そこへ上述したように調整したアマモ植物片を 10 株移植した（地下部を底質中に埋めた)。FFC 処理区には、水槽中の底質上に FFC セラミックスを 100g 入れた。

FFC 製品を添加しない対照区と FFC セラミックス区の水槽を、20°C、白色蛍光灯下に静置し、120 日間培養を行った後、アマモ植物体を組織ごとに分割して（葉、葉鞘、地下茎、根束)、長さおよび重量を測定した。

【結果】

培養 120 日目の水槽内と掘り出した植物体の様子を図 1 に示す。FFC セラミックス区では、対照区と比べて、生存個体数が多く、アマモの地上部および地下部の生長が顕著に旺盛であった。

図 2 に、対照区および FFC セラミックス区の葉および地下茎の乾燥重量を示す。FFC セラミックス区の方が、葉で 2.57 倍、地下茎で 3.89 倍、乾燥重量が高かった（葉は危険率 5％で、地下茎は 1％で有意差あり、*t* 検定)。

【考察（結果から予想できること）】

実際の海洋環境では様々な要因が複雑に絡み合っているため、水産関連の事業者様の周辺海域でのアマモの生育と FFC 製品の使用の関連を明らかにすることは難しい。本実験は、水槽という実際の海域とは異なる閉鎖的な環境で行われたものではあるが、FFC セラミックスの使用によってアマモの生育が顕著に促進した。したがって、実際の海域でのアマモ場復活に FFC ウォーターの流入が関与している可能性は十分に考えられる。

【図】

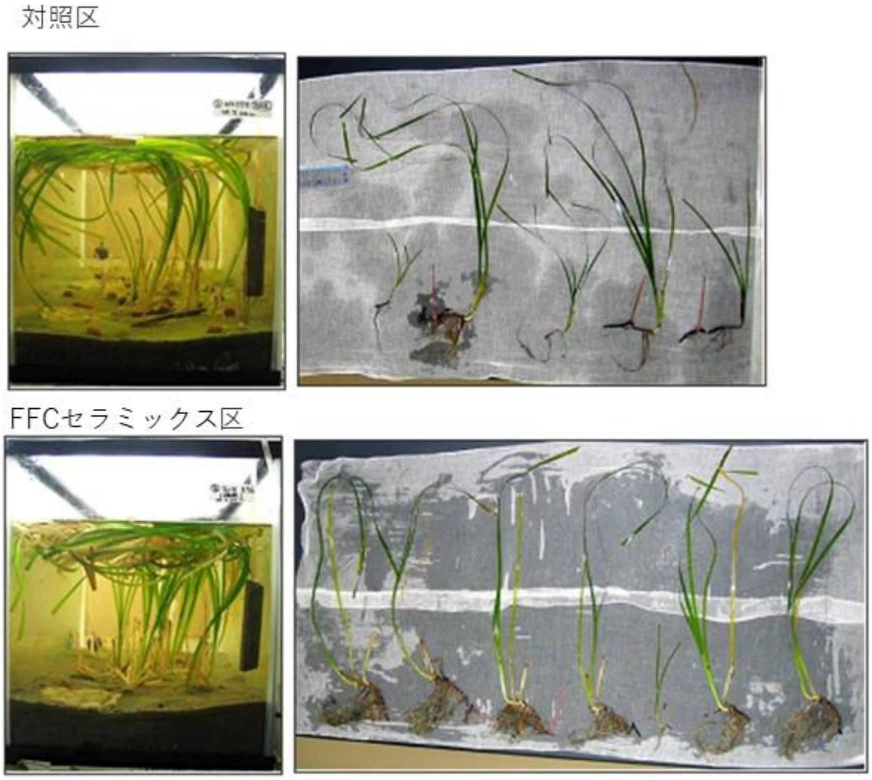


図 1　培養 120 日目の水槽内と掘り出した植物体の様子

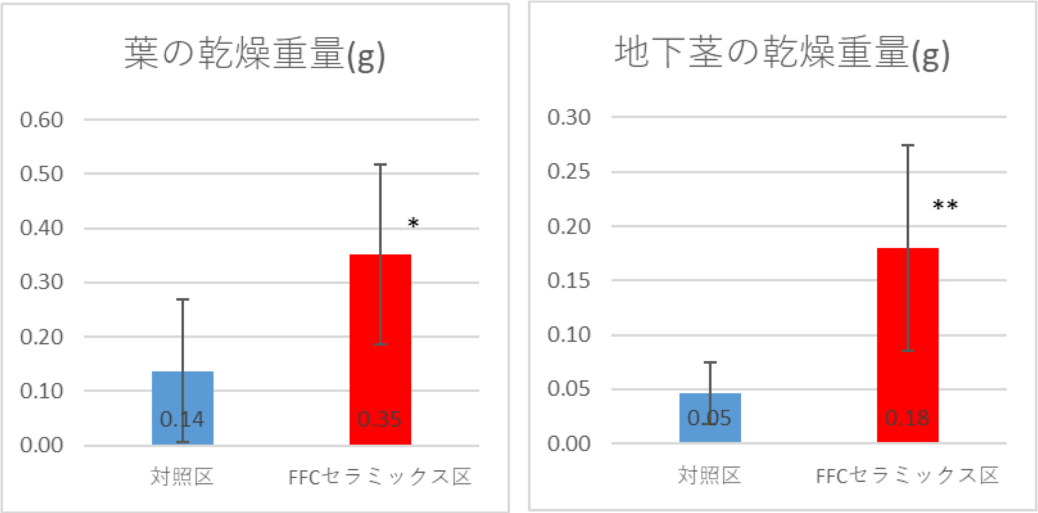


図 2　培養 120 日目の葉と地下茎の乾燥重量(g)

*危険率 5%で有意差あり、*危険率 1%で有意差あり（*t*検定）

天草市宮地浦湾でのアマモ育成試験

【背景】

天草市宮野河内湾の枝湾である宮地浦湾では、かつてはアマモやコアマモが繁茂し、海洋資源にも恵まれていたが、1970 年代頃から環境が徐々に悪化し始め、2000 年頃になると夏季の赤潮や冬季の麻痺性貝毒が問題となり、海洋資源も減少の一途を辿っていた。

赤塚植物園グループでは、2004 年 4 月に天草市宮野河内湾にて FFC セラミックス 18 トンおよび FFC 海用改質材 1000 袋を施用した“天草ドラゴン伝説”を実施し、湾内の環境改善に取り組んできた。

熊本県天草市にて FFC セラミックス
18 トンを付けた筏の設置

アマモ場は、海の汚れの原因となる窒素やリンを吸収する浄化作用があるだけでなく、魚介類のえさ場や産卵場所、幼・稚魚の棲家にもなり、漁獲量の増加をもたらすなど、沿岸海域の環境に大きな役割を果たすことが知られている。そのため、アマモ場を回復させることは、海域の環境を改善する上で極めて重要なことと言える。

そこで、2006 年秋に宮地浦湾内にアマモ種子を播種し、ドラゴン伝説以降の宮地浦湾の環境で①アマモが生育するか否か、②アマモの生育に対して種子付近に施用した FFC セラミックスが効果を及ぼすのか、調査した。

【方法】

宮地浦湾奥の浅い海域を試験実施場所とし、大潮干潮時に水深約 4m となる地点を選択した。播種には近隣海域のアマモ場で 2006 年に採取した種子を使用した。播種はゾステラマット※による方法で行った。1 枚のゾステラマット(50cm×50cm)へ試験実施場所の底泥 500cc と種子約 500 粒を挟み込み、2006 年 11 月に潜水により海底へ設置した。FFC 処理として、1 枚のゾステラマットに対して FFC セラミックス 10 粒(約 40g)を、底質および種子と一緒に挟み込んだ。

2007 年 4 月（播種から 5 ヵ月後)、アマモの発芽・生育状況を把握するため、潜水によるアマモ植物体の採取および測定を行った。まず、潜水によりゾステラマットを海底から引き上げ、船上で鉄枠を外し、アマモ植物体がヤシ繊維マットに定着した状態のままビニール袋へ入れ、冷蔵保存で赤塚植物園グループの生物機能開発研究所へ持ち帰った。その後、ヤシ繊維マットから、アマモ植物体を丁寧に取り外し、海水に浸した状態で測定時まで 4°Cで保存した。

測定項目は、株数、最大葉長、葉数、鞘長、地下茎長、節数、最大根長、根数、各部の乾燥重量とした。最大葉長、葉数、鞘長、地下茎長、節数、最大根長、根数については、葉幅が 0.5cm 以上ある個体のみ測定した。

※ゾステラマット…目合いの異なる 2 種類のヤシ繊維マット(50cm×50cm)を金網でサンドイッチ状に挟んだ、アマモ場の造成に用いられる器具

【結果】

対照区および FFC セラミックス区のいずれも、図 1 のようにマット上での発芽および生長が確認された。この結果は、ドラゴン伝説以降の宮地浦湾ではアマモ種子が発芽し、少なくとも 5 ヵ月間は生存することが可能であることを示している。

マット上で生育した株数および地下茎の分岐数は、対照区では 74 および 16 であったが、FFC セラミックス区では 92 および 31 といずれも多く、特に地下茎の分岐は約 2 倍と顕著に盛んであった。

各測定項目の中では、葉数、根数、地上部の長さ、最大根長、地上部乾燥重量、地下部乾燥重量が FFC セラミックス区の方が有意に高値であった($p<0.05$, t 検定)（図 2)。有意差が認められなかった測定項目でも、すべて FFC セラミックス区の方が高値を示した。

【考察（結果から予想できること)】

海域でのアマモの生長は、水深を含めた周囲のいくつかの環境によって影響を受けることが知られている。本実験では両区とも水深 4m で、距離も 2m ほどしか離れていないため、ほぼ同じ環境での比較であるにもかかわらず、FFC セラミックスをゾステラマットに挟み込むだけで、生存数や地下茎の分岐数が増加し、各個体の生育も促進されていた。水槽内での実験(FFC 研究レポート「FFC セラミックスのアマモ生長への効果検証（水槽実験)」)だけでなく、実際の海域においても FFC セラミックスによってアマモの生存や生育が向上することが確認されたことから、FFC セラミックスがアマモ場造成に役立つことが、より強く支持される。また、西明水産様のように FFC セラミックスで処理した水が流入した先でアマモが繁殖した事例との関連も示唆される。

アマモは種子を拡散させる方法と地下茎を伸ばし分岐を増やす方法で生息範囲を拡大させていくため、アマモ場拡大の観点から考えると、発芽後の生存率が向上し、且つ地下茎の分岐を促進させる FFC セラミックスの効果は、非常に有用である。

【図】

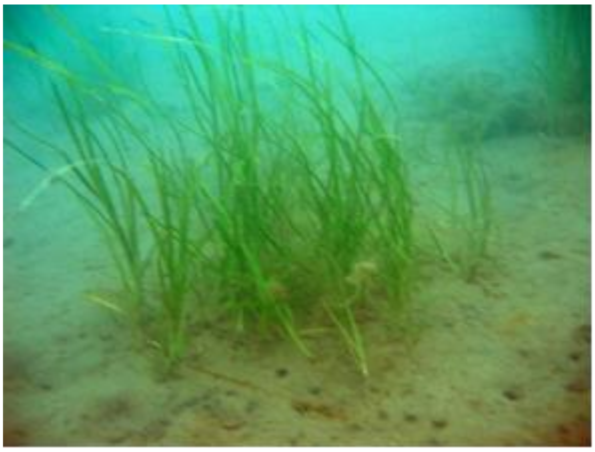


図 1 ゾステラマット上に生育するアマモ

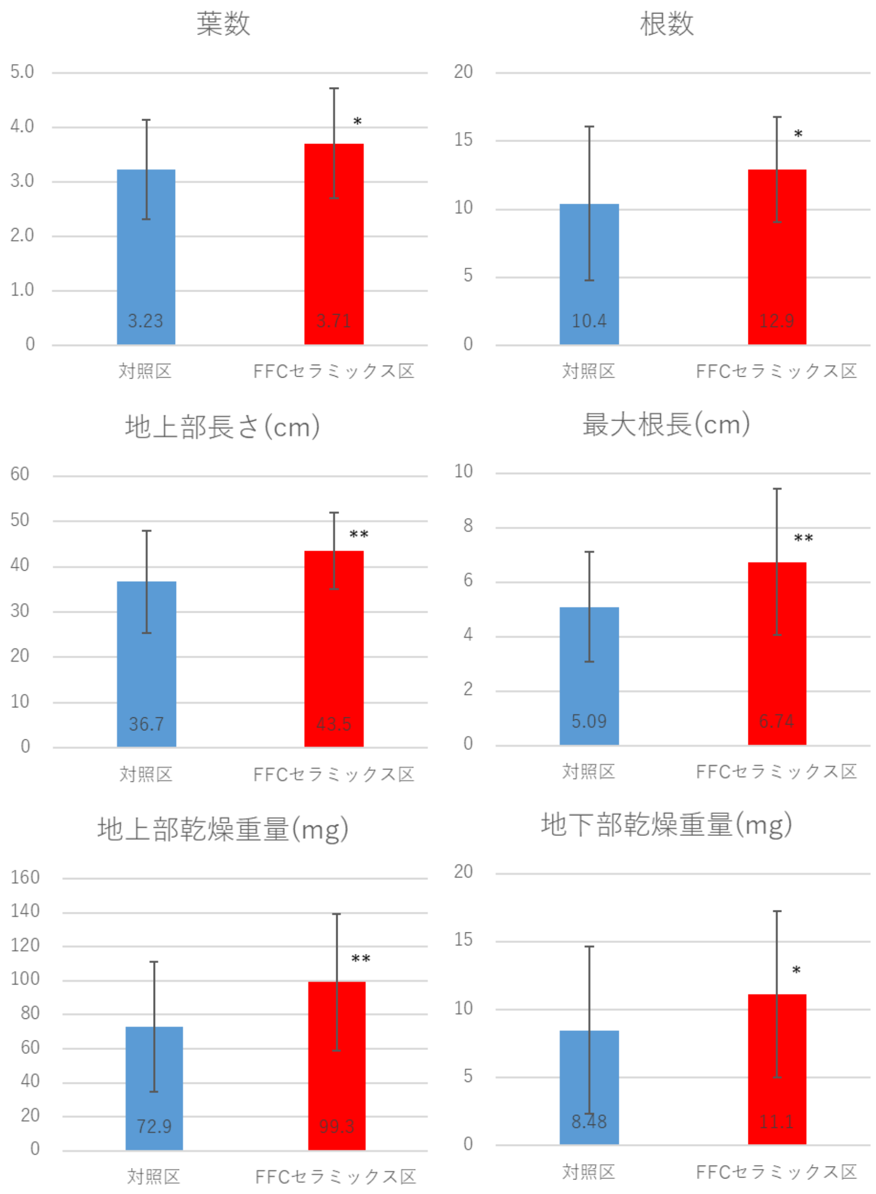


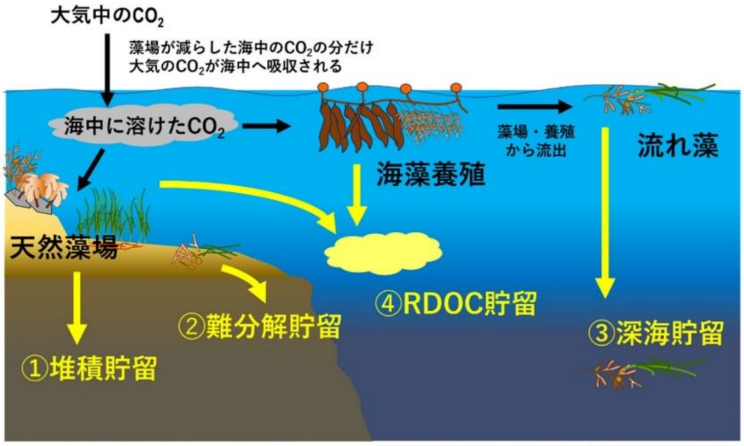
図 2 ゾステラマット上に生育したアマモの葉数、根数、地上部の長さ、最大根長、
地上部乾燥重量、地下部乾燥重量
*危険率 5％で有意差あり、**危険率 1％で有意差あり（*t* 検定）

アマモ実生苗の光合成活性に対する FFC セラミックスの効果

【背景】

近年、わが国では水質浄化や水産資源保護、ブルーカーボンの観点から、アマモ場の重要性が見直されている。

赤塚植物園グループでは、水槽および実際の海域でアマモの育成試験を行い、FFC セラミックスの施用によりアマモの生育が促進されることを明らかにしている(FFC 研究レポート「FFC セラミックスのアマモ生長への効果検証（水槽実験）」､「天草市宮地浦湾でのアマモ育成試験」)。



ブルーカーボン生態系における大気中 CO2 に由来する
有機炭素の海中での流れと 4 つの貯留プロセス
出所：水産研究・教育機構（2023）海草・海藻藻場の
CO2 貯留量算定ガイドブック．水産研究・教育機構，p. 3.

植物の生育が促進される一因として、一般的には光合成活性の向上が考えられる。そこで、本実験では、FFC セラミックスによるアマモの生長促進メカニズムを明らかにするため、FFC セラミックスがアマモ実生の光合成活性に与える影響を調べた。

【方法】

プラスチック製の容器に、アマモ種子採取場所（松阪市松名瀬海岸）の底砂 100g と津市の海岸で採取した海水 200mL を入れ、ここへ東広島市西明水産様地先にて採取したアマモ種子を 30 粒播種した。この容器を、12 時間明期（25 μmol/m^2/s)、12 時間暗期、15°Cで約 1 ヵ月間培養し、本葉が 3 枚のアマモ実生苗を得た。

上述の実生苗について、プロダクトメーターを用いて、光合成反応による酸素放出速度を測定した。光合成反応に使用する“普通海水”として、津市の海岸で採取した天然の海水に複数の成分を補強した PES 海水を用い、この PES 海水 1 L に FFC セラミックス 20.2 g（大 6 個）を添加し、暗所、20°Cで 24 時間静置したものを“FFC 海水”として用いた。光合成反応容器および対照容器は試験管型を使用し、反応容器内の海水量は 15ml とした。光合成反応のための光源としてスライドプロジェクターを用い、測定時の光強度を、150 μmol/m^2/s とした。1 回の測定にアマモ実生苗 3 個体を同時に使用し、実生苗による酸素放出量を 6 分間ごとに記録し、30 分間測定し続けた。アマモ実生苗 3 個体ごとに、初めに普通海水中で測定した後、FFC 海水に入れ替えて 30 分間馴化させた後、FFC 海水中で測定した。アマモの葉面積は、スキャナーで取り込んだ画像を元に、ScanImage を用いて算出した。

【結果】

酸素放出量の測定結果を図 1 に示す。アマモ実生苗 3 個体を 1 セットとして、異なる個体で 17 回測定した平均値である。普通海水中(対照区)では酸素放出速度が 8.20±0.54 μL/cm^2/ h （平均±標準誤差）であったのに対し、FFC 海水中(FFC セラミックス区)では 10.25±0.87 μL/cm^2/ h（平均±標準誤差）であり、対応のある *t* 検定（ $p<0.01$）により、有意差が認められた。

【考察（結果から予想できること)】

図には示さないが、普通海水中と FFC 海水中での測定に用いたものとは別の個体を用いて、普通海水から普通海水に海水交換する前後での酸素発生速度も調べたが、交換前は 13.98±2.19 μL/cm^2/ h（平均±標準誤差）であったのに対し、交換後は 12.20±1.41 μL/cm^2/ h（平均±標準誤差）となり、海水の交換によって光合成速度がやや低下する傾向があった(有意差なし,対応のある *t* 検定, n=6)。したがって、普通海水から FFC 海水への交換によって起こるアマモ実生苗の酸素発生速度の増加には、海水の交換操作が正の影響をしているとは考えにくく、FFC セラミックスによる海水への処理が光合成活性を向上させたと考えられる。つまり、水槽や実際の海域での実験で見られた FFC セラミックスによるアマモ生長促進の一因は光合成活性の向上にあると考察される。

ただし、アマモ実生苗を用いる測定では、酸素吸収速度（呼吸速度）が非常に小さく、酸素発生速度に吸収速度を考慮した純光合成速度を求めることは困難であった。将来的にはもう少し成長したアマモ個体を使用して純光合成速度を比較することが望まれる。

また、FFC セラミックスで処理した海水中でアマモの光合成活性が向上するメカニズムの解明は今後の課題として残る。

【図】

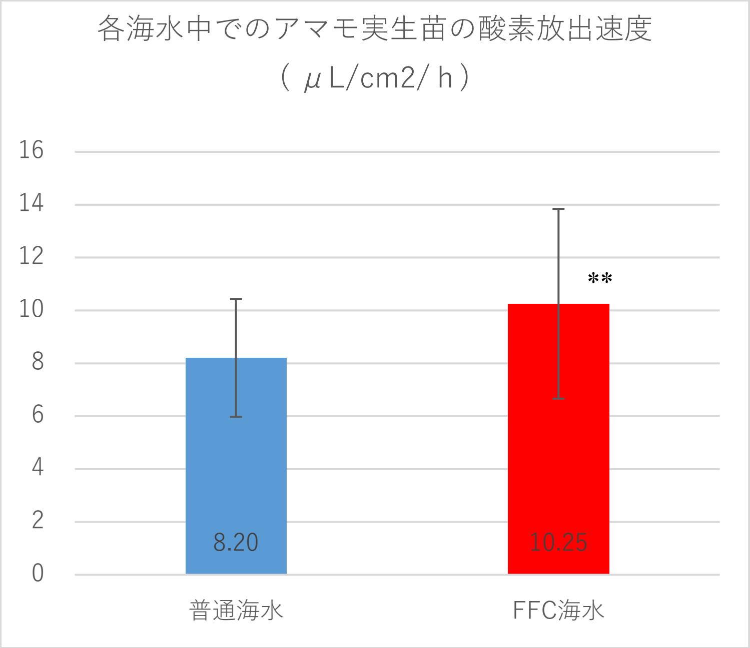


図 1 普通海水(対照区)と FFC 海水(FFC セラミックス区)での酸素放出速度比較
**危険率 1%で有意差あり(繰り返しのある *t* 検定)

FFC 製品のコアマモ生長への効果検証（水槽実験）

【背景】

干潟に生息するコアマモとカニ、貝類

コアマモはアマモ属の海草で種子または地下茎の分岐によって繁殖し、日本では北海道から沖縄まで広く分布している。アマモと同属だが、コアマモは草体長 3～30cm、葉幅 1～2mm とアマモよりもずっと小さい海草である。アマモが水深 1～5m の低潮線以深に生息するのに対して、コアマモは干出する低潮線付近から水深 1m 以浅に生息し、干潟の維持や干潟から浅場にかけての生物の保全など、干潟や浅場における連続的な生態系に重要な役割を果たしている。アマモ同様にコアマモの群落も、沿岸域の埋め立てや水質汚濁による生育環境の悪化などにより全国的に減少傾向であり、環境省のレッドリストではランク外であるものの、数十の県のレッドデータブックには絶滅危惧や準絶滅危惧として掲載されている。しかし、コアマモはアマモに比べて生態、生理的知見が少なく、再生に向けた取組についても実施例が少ないのが現状である。

赤塚植物園グループでは、2004 年 4 月に天草市宮地浦湾にて FFC セラミックス 18 トンおよび FFC 海用改質材 1000 袋を施用した“天草ドラゴン伝説”を実施以降、環境が悪化する以前は湾奥部に繁茂していたコアマモについて、その分布域を調査してきたが、年々増加していることを確認している(FFC 研究レポート「天草市宮地浦湾のコアマモ生育エリア調査」参照)。

そこで、本実験では、FFC セラミックスがコアマモの生長にどのような効果を及ぼすのか、水槽実験により検証した。

【方法】

三重県伊勢市池の浦海岸のコアマモ繁殖域にて、コアマモ成熟株の地下茎先端 2 節分を、地上部を残したまま採取した。ガラス製の水槽(27cm×14cm×16cm)にコアマモ採取現場の底質約 1.8 L、海水 4 L を入れ、そこへ上述したように調整したアマモ植物片を 12 株移植した（地下部を底質中に埋めた）。FFC 処理区には、水槽中の底質上に FFC セラミックスを 5 粒(約 20 g)入れた。

FFC 製品を添加しない対照区と FFC セラミックス区の水槽を、20°C、白色蛍光灯下に静置し、64 日間培養を行った後、アマモ植物体を組織ごとに分割して（地上部、地下茎、根）、長さおよび重量を測定した。

【結果】

培養 64 日目の水槽内と掘り出した植物体の様子を図 1 に示す。両区とも 10 個体が生存していたが、FFC セラミックス区では、対照区と比べて、地下茎が顕著に伸長し、地下茎の節から葉や根が多く出現していた。

図 2 に、対照区および FFC セラミックス区の葉、地下茎および根の乾燥重量を示す。FFC セラミックス区の方が、地上部で 1.29 倍、地下茎で 2.47 倍、根で 2.30 倍、乾燥重量が高値であった（地下茎と根は危険率 1%で有意差あり、*t* 検定）。

【考察（結果から予想できること）】

コアマモもアマモ同様沿岸域の生態系にとって非常に重要な海草だが、アマモほど造成に関するノウハウが蓄積していない。本実験は、宮地浦湾にてドラゴン伝説以降に復活したコアマモの生育が FFC 製品によるものか検証する意図もある。水槽という実際の海域とは異なる閉鎖的な環境で行われたものではあるが、FFC セラミックスを水槽内に入れることでコアマモの生育、特に繁殖域の拡大にとって重要である地下茎や根の生育が顕著に促進した。したがって、ドラゴン伝説での宮地浦湾への FFC 製品の施用がコアマモ生育エリアの拡大に関与している可能性は十分に考えられる。

【図】

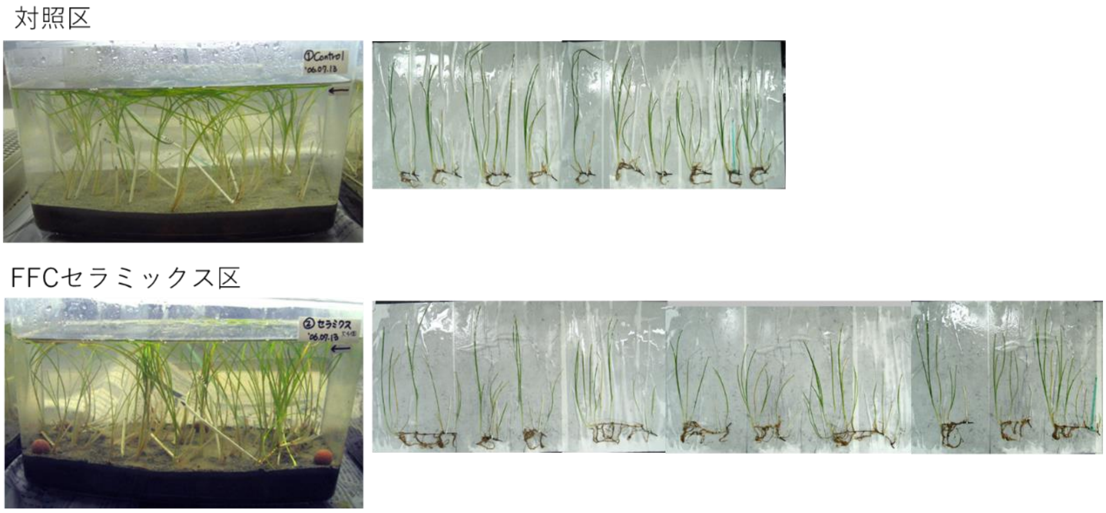


図 1 培養 64 日目の水槽内と掘り出した植物体の様子

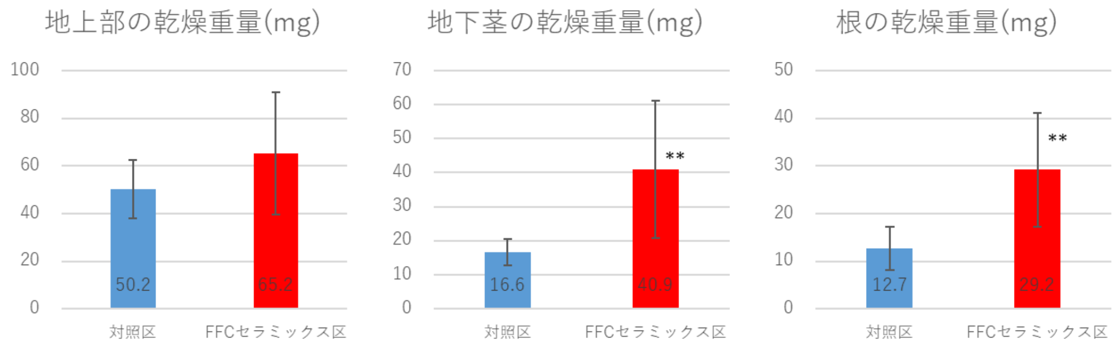


図 2 培養 64 日目の地上部、地下茎および根の乾燥重量
**危険率 1%で有意差あり（*t* 検定）

天草市宮地浦湾のコアマモ生育エリア調査

【背景】

熊本県天草地方の宮野河内湾にて、2004 年 4 月に行政や漁業関係者とフィランソ会員様、赤塚植物園グループが一体となり、FFC による海の環境改善のためのイベント"天草ドラゴン伝説"を実施した。

このイベントでは、FFC セラミックス 18 トンを 1 トンごと筏に吊るして湾内の各所に設置し、沿岸や漁船から FFC 海用改質材 1000 袋を湾内に施用した。

GPS を使用したコアマモ生育エリアの調査

宮野河内湾の環境改善の一環として、宮野河内湾の枝湾である宮地浦湾にかつては繁茂していたコアマモを復活させることを目標としていた。なぜなら、コアマモは干潟から浅海の生態系の基盤となる生産者であり、海を豊かにするためには重要な海草だからである。

そこで、2004 年から 2018 年まで宮地浦湾の湾奥部にて、ドラゴン伝説にて FFC セラミックスおよび FFC 海用改質材を施用した後に、コアマモの生育エリアがどのように変化するのか調査した。

【方法】

2004 年は現地での目視調査と写真の記録から、コアマモの生育エリアを推定した。2006 年から 2018 年までは、年間 0~2 回の頻度で、GPS 測量機（NetSurv3000）を使用して、複数の斑状に点在するコアマモの生育エリアの位置データを正確に収集し、生育エリアの総面積や分布の推移を明らかにした。

【結果】

GPS 測量機による正確な測定を開始した 2006 年から 2018 年までの宮地浦湾奥部のコアマモ生育エリアの総面積を図 1 に示す。この間、コアマモの生育エリアの総面積は約 4 倍に増加した。2006 年から 2013 年まではコアマモの生育エリアは平均で年間 2,391m^2 ずつ増加し続け、2013 年以降はほぼ横ばい(年間平均で 369m^2 ずつ増加)の状態が継続している。

2004 年、2007 年、2011 年、2013 年、2018 年の春期のコアマモ生育エリアの分布図を図 2 に示す。2007 年時点では個々の生育エリアが小さく疎らであったが、2011 年以降は個々の生育エリアが拡大し、繋がっている様子がわかる。

【考察（結果から予想できること)】

本調査では、宮地浦湾にてドラゴン伝説以降のコアマモ生育エリアをモニターしたが、正確な測量を開始した 2006 年から 2018 年までの 12 年間でコアマモの生育エリアの総面積は 4 倍に増加した。2013 年以降はほぼ横ばいになったが、おそらく湾奥部のコアマモが生育できる条件が揃った場所の大部分にコアマモの生育エリアが拡大した結果だと考えられる。

沿岸部では、FFC 製品の施用以外にも、周囲からの排水や河川水の流入、工事など人為的な活動による影響が常に変動しているため、本調査で認められたコアマモ生育エリアの拡大が FFC 製品の施用によるものだと結論付けることは難しいが、水槽実験の結果(FFC 研究レポート「FFC 製品のコアマモ生長への効果検証（水槽実験)」)なども併せて考えると、FFC 製品が沿岸部のコアマモの生育に良好な影響を与えた可能性は十分にあると考えられる。

コアマモは沿岸域の生態系にとって非常に重要な海草だが、コアマモ場の再生事例は極めて少ないうえ、既存の生育エリアからの移植が一般的な造成方法で大きな労力やコストを要する。FFC 製品の施用以降にコアマモ生育エリアが拡大した本調査結果は、干潟から浅海にかけての生態系の再生に向けた希望となるかもしれない。

【図】

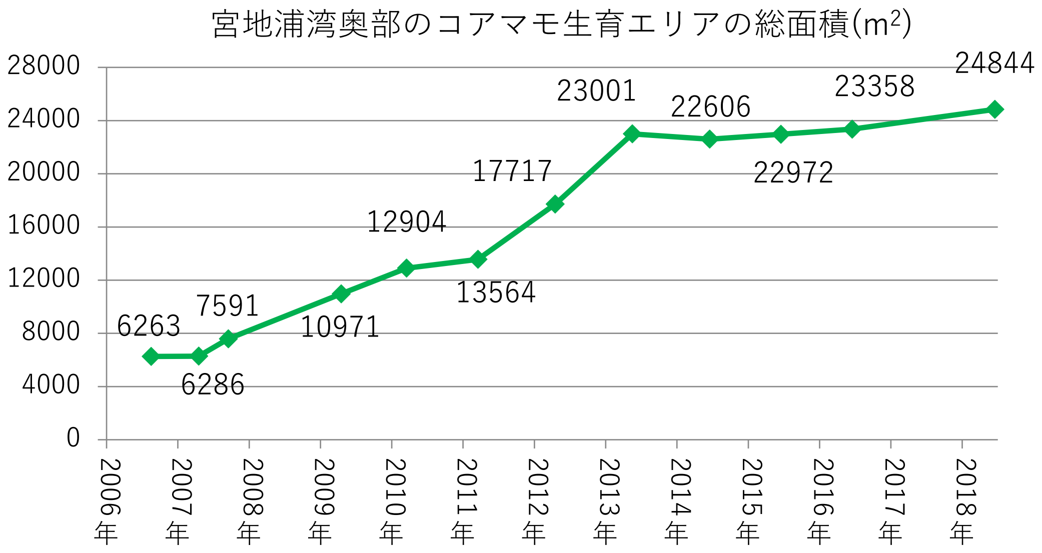


図 1 宮地浦湾奥部のコアマモ生育エリア総面積の経時変化

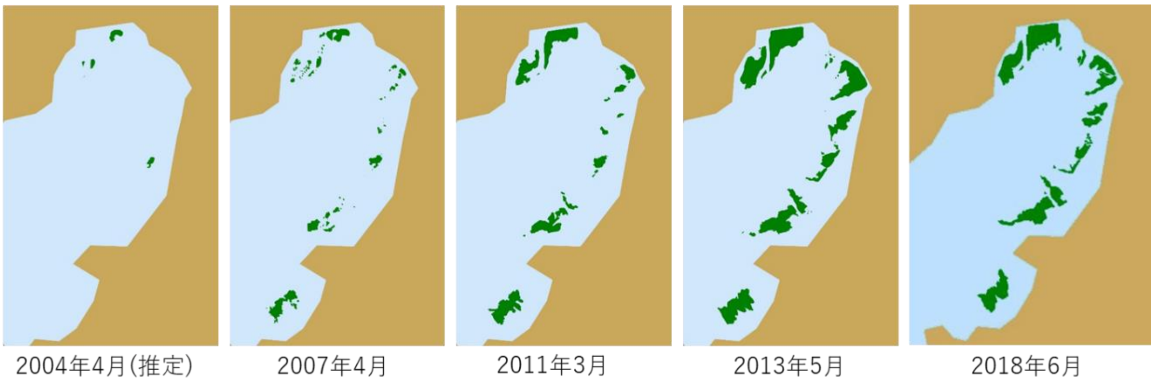


図 2 宮地浦湾奥部のコアマモ生育エリア分布の経時変化