

微細な海中粒子の増大する環境下における藻場が受ける影響および藻場の再生手法の検討

The negative effect on marine forests of fine sediment particles, and an examination of restoration techniques

荒川久幸*・鈴木秀和*・大草駿**・樋口謙**・三橋賢太郎**・佐藤陽**

Hisayuki ARAKAWA, Hidekazu SUZUKI, Shun OHKUSA, Ken HIGUCHI, Kentaro MITSUHASHI
and Minami SATO

* 東京海洋大学 学術研究院 教授

** 東京海洋大学 大学院 学生

The increase in marine sediment particles has a great impact on coastal ecosystems, and there are cases of degraded macrophyte communities. We clarified the negative effects of fine sediment particles and examined methods for regenerating marine forests in the Mio sea area, Wakayama Prefecture, Japan, where there are considerable volumes of sediment particles. We found many sedimentary particles of sub-micron size in devastated marine forests in the Mio area. Particles of this size significantly inhibit zoospore substrate attachment and gametophyte growth. We also investigated the negative effect of sedimentary microplastic particles on zoospore substrate attachment, and found they inhibited attachment. The negative effect, however, was smaller than that of inorganic particles. Our study found that sedimentary particles in the Mio sea area had a considerable effect in depleting marine forests. We suggest that transplanting larvae is a suitable way of regenerating marine forests in such areas, where the sea is very turbid.

Key Words : initial depletion, marine forest, restoration technique, sub-micrometer particle

1. 序論

海中粒子の増大は沿岸生態系に強い影響を及ぼしている。本研究では、粒子によって海藻群落荒廃した海域(和歌山県三尾地先)において、その粒子の影響を明らかにするとともに、その海域で海藻群落を再生させる手法について検討した。ここでは、沿岸で増大する海中粒子として微細な無機粒子(サブマイクロサイズ)の影響を取り上げた。

第一に、粒子で海藻群落荒廃した海域におけるサブマイクロサイズ粒子の量およびその分布を調べるとともに、岩礁の微細藻類群集を明らかにし、両者の関係を検討して、サブマイクロサイズ粒子の存在と岩礁生態系の変化との関連を明らかにする。さらに、近年問題視されているマイクロプラスチック¹⁾の海藻の発生初期への影響について検討する。

第二に、従来の群落再生事業は、遊走子の播種によって行われてきた。しかし基質への粒子堆積が多い海域では効果が得られないと考えられる。本研究では幼孢子体を使用した再生手法を用いる。当該海域の近隣の群落で遊走子をロープに着生・成長させ、移植する方法を検討する。

2. 研究方法

2.1 微細粒子の海藻群落への影響

(1) 海底の堆積粒子調査

粒子によって海藻群落荒廃した海域(和歌山県日高郡三尾地先)²⁾および海藻群落が維持されている海域(和歌山県御坊市野島地先)において、平成30年10月16日に、海底(水深約6m)の海藻礁上³⁾に堆積する粒子をスクーバ潜水によるエアリフト法によって採取した(図-1)。採取サンプルは、粒子量、強熱減量および粒径を分析した。粒子量は乾燥後、秤量して求めた。強熱減量は乾燥後の粒子を600℃で熱し、秤量して求めた。粒径は粒径測定装置(Sald 2300, 島津製作所社製)で調べた。

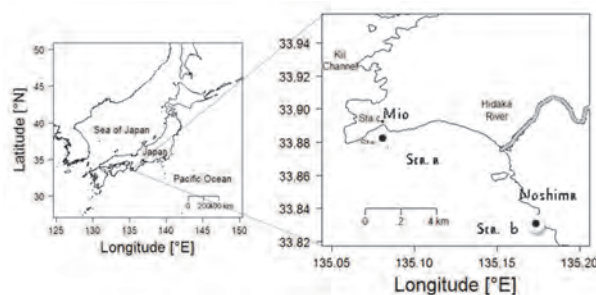


図-1 調査海域

(2) 生物相調査

海底堆積粒子の違いによる付着珪藻および岩礁生物相の相違について検討した。牡蠣殻ブロック(シェルナース, 海洋建設株式会社製)を2019年9月4日三尾および野島の海藻礁(水深6m)に設置し, 2020年2月3日に回収した。

珪藻試料は, 回収したカキ殻表面をナイロン製の歯ブラシで擦り取って得た。珪藻細胞の観察は, 定法⁴⁾に従って行った。岩礁の生物相は牡蠣殻に付着もしくは牡蠣殻間に生息するものを採取し, 個体数および湿重量を測定した。

(3) サブマイクロ粒子がアラムの発生初期に及ぼす影響

三尾地先にはサブマイクロサイズ粒子が堆積している。サブマイクロサイズ粒子によるアラム遊走子の基質着生および配偶体の成長・生残への影響を調べた。アラム *Ecklonia bicyclis* の孢子体は千葉県南房総市白浜地先, 福島県いわき市四倉地先, 茨城県ひたちなか市で採取し, 遊走子懸濁液を得た。懸濁液の遊走子濃度を計数し, 適宜希釈して実験に供した。

粒子は, サイズの異なる炭化ケイ素粒子を用いた。粒子 A および B の粒径分布は一つの極大を持ち, 平均粒径はそれぞれ 1.1 μm および 3.9 μm であった。基質上(界線入りスライドガラス)に種々の量で粒子を堆積し, アラム遊走子の着生成成功率を調べた。つぎに基質へ着生した配偶体上に種々の量で粒子を堆積し, インキュベータ内で培養した。培養 12 日後に配偶体の全長と生残数を測り, 配偶体の成長および生残への影響を調べた。

(4) マイクロプラスチックがアラムの発生初期に及ぼす影響

粒子として PET 粒子を用いて, アラム遊走子の基質着生への影響について調べた。PET 粒子の平均粒径は 218 μm とした。実験手法は, 遊走子の基質着生の阻害実験と同じである。

2.2 海藻群落の再生手法の検討

粒子の多い海域では堆積粒子による発生初期の大きな減耗により, 遊走子による再生産は難しい。多数の幼孢子体を作成し, それらを移植して群落を再生する手法を検討した。幼孢子体の作成は, アラムでは福島県いわき市小名浜港内で, カジメでは三尾地先の南東方向に位置する御坊市野島地先において行った。両海域に遊走子付着のためのロープおよびロープネットを設置した。着生した遊走子はロープ等を数か月放置することにより, 配偶体期を経て, 幼孢子体とした。孢子体の

付いたロープ等は孢子体サイズおよび個体数を計測したのち, 三尾地先に設置した。

さらに, 三尾地先の照度および水温の調査結果をもとに, アラムおよびカジメの成長に適した水深および水の濁りの影響を数値実験で検証した。

3. 結果および考察

3.1 海中林荒廃海域の堆積粒子

海底堆積粒子量は, 三尾で 2.03 \pm 0.643 mg/cm², 野島で 2.07 \pm 1.95 mg/cm² であった。両地点の堆積粒子量について, スチューデント t 検定を行った結果, 有意差はみられなかった。

三尾地先の堆積粒子の粒径は, 0.475–420 μm の範囲にあり, その平均粒径は 39.1 μm であった。一方, 野島地先の堆積粒子は 3.60–857 μm の範囲で存在し, その平均粒径はそれぞれ 185 μm であった。三尾地先では粘土(2 μm 未満)が約 0.86%, シルト(2 μm 以上 20 μm 未満)が約 24% であった。一方, 野島地先では粘土は見られず, シルトが約 6.2% であった。すなわち, 三尾地先にはシルト以下の粒径の粒子量が野島地先の約 4 倍存在すること, サブマイクロサイズの粒子が堆積していることが分かった。

3.2 海中林荒廃海域の生物相

付着珪藻の出現種は野島では 16 属 26 種, 三尾では 15 属 23 種, 多様性指数は野島では 3.92, 三尾では 3.61 で, 野島の方がわずかに多様性は高いが, 出現種別で見ると, 優占種は両者とも *Amphora exigua* と *Tabularia investiens* で等しく, 種組成も両者に大きな相違はなかった。

三尾の牡蠣殻ブロックでは, 海綿動物 5 種, 扁形動物 1 種, 外肛動物 9 種, 軟体動物 18 種, 星口動物 1 種, 環形動物 7 種, 節足動物 28 種, 棘皮動物 6 種, 脊索動物 1 種であった。野島ブロックでは, 海綿動物 5 種, 扁形動物 1 種, 外肛動物 2 種, 軟体動物 10 種, 星口動物 2 種, 環形動物 14 種, 節足動物 25 種, 棘皮動物 1 種, 脊索動物 6 種であった。湿重量は三尾で 20.9g, 野島で 27.0g であった。海中林の荒廃海域においても種数や量に明瞭な相違は見られなかった。

3.3 サブマイクロ粒子の影響

(1) 遊走子の基質着生への影響

着生率はいずれの粒径においても, 基質上の堆積粒子量が増加するにつれて指数関数的に減少し, 各粒径で堆積粒子量と着生率の間には有意 (Spearman's

rank correlation, $p < 0.05$, 粒子 A および B で $r_s = -1$, および -1) な負の相関がみられた. それぞれの粒子におけるアラメ遊走子の着生率と堆積粒子量の関係式は, 以下となった.

$$\text{粒子 A } A_r = 100 \exp(-23.7 Q) \quad (1)$$

$$\text{粒子 B } A_r = 100 \exp(-10.6 Q) \quad (2)$$

ここで, A_r はアラメ遊走子の着生率(%), Q は堆積粒子量(mg/cm^2)である.

(2) 配偶体の成長および生残への影響

生残率は配偶体上の堆積粒子量が増加するにつれて指数関数的に減少し, 両粒径で堆積粒子量と生残率の間に有意(Spearman's rank correlation, $p < 0.05$, 粒子 A および B で, $r_s = -1$, および -1) な負の相関がみられた.

$$\text{粒子 A } S_r = 100 \exp(-2.06 Q) \quad (3)$$

$$\text{粒子 B } S_r = 100 \exp(-1.49 Q) \quad (4)$$

ここで, S_r はアラメ配偶体生残率(%), Q は堆積粒子量(mg/cm^2)である.

堆積粒子 A と B(平均粒径 $1.1 \mu\text{m}$ および $3.9 \mu\text{m}$) では粒径が小さいほど, アラメ遊走子の着生と配偶体の成長および生残が阻害された. Watanabe *et al.*⁵⁾ で報告された結果と比べると, $15 \mu\text{m}$ では $1 \text{mg}/\text{cm}^2$ で着生率が $31.8 \pm 1.6\%$ であったのに対し, 粒子 A では堆積量 $0.1 \text{mg}/\text{cm}^2$ で着生率が $10 \pm 6.2\%$ となった. したがって堆積量は 10 分の 1 であるにも関わらず着生率は約 3 分の 1 に減少し, $15 \mu\text{m}$ に比べて $1-4 \mu\text{m}$ の粒子の堆積の影響は甚大であった. 特に基質着生への影響は, 配偶体の生残への影響に比べて, 大きかった. これらのことから, 微細な海底堆積粒子の大型褐藻類の海中林への影響は遊走子の基質着生で著しく大きいことが分かった.

3.4 マイクロプラスチックのアラメ発生初期へ及ぼす影響

マイクロプラスチックの堆積粒子量が増加するほど, 着生率は指数関数的に減少した. 堆積粒子量と着生率の間には有意な負の相関(Spearman's rank correlation, $p < 0.05$, $r_s = -1$) がみられた.

同じ粒径のプラスチックとグラスビーズ⁵⁾の影響を比較すると, 同じ粒子量の時の着生阻害はプラスチックで小さかった. この原因は今のところはっきりしない. プラスチックは比重が小さいことによって粒子の堆積が粗になり, その間に遊走子が侵入し着生に成功するのかもしれない.

3.5 海藻群落再生手法の検討

(1) 幼胞子体の作出

アラメ幼胞子体は福島県いわき市小名浜港内のロープに多数着生した. 2018 年 2 月に移植した 3 本のロープのアラメ幼胞子体の全長と個体数は $10.9 \pm 5.5 \text{ cm}$ と 347 個体であった. 6 月には全長 50 cm を超える個体が見られた. しかしながら, 台風 21 号および 24 号の影響ですべて流出した.

また 2019 年 1 月に移植した 9 本のロープのアラメ幼胞子体の全長と個体数は $6.2 \pm 1.6 \text{ cm}$ と 134 個体であった. 一方, カジメ幼胞子体は, 和歌山県野島地先に設置したロープネットに多数観察された. 2019 年 3 月に移植したロープネットのカジメの総数が多く, 数えられなかったが, 全長は平均 $21.6 \pm 6.0 \text{ cm}$ であった. 2019 年 5 月 27 日に全長を計測したところ, $28.1 \pm 10.3 \text{ cm}$ に成長した.

(2) 海域への展開手法

照度(照度消散係数)および水温を変数とした数値実験を行い, アラメおよびカジメ胞子体の成長を検討した. 数値実験結果と三尾に移植したアラメおよびカジメの成長とほぼ合致した. このことから, 数値実験手法が適切であると判断した(図-2).

そこで, 三尾地先の照度と水温から, 海水の濁りが変化した場合の成長について, 数値実験した.

三尾地先の照度消散係数は約 0.3 m^{-1} であることから, 三尾地先でアラメを移植する場合にはそれぞれ 3 m 以浅が適していると考えられた. しかし水深が浅いほど夏の高水温や時化時の波浪の影響が強い. これらのことを総合すると 3 m 程度への移植が最適といえた. 一方, 三尾地先(照度消散係数 0.3 m^{-1})へカジメ幼胞子体を移植する場合には 5 m 程度が適していると考えられた(図-3).

4. 結論

三尾地先では, 高濁度水がたびたび観測されることにより, 海底へ到達する照度の低下がみられた. また海底の堆積粒子量は多く, 特にサブマイクロサイズの粒子が多く含まれていた. このことは, 室内実験の結果を考え合わせると, 遊走子の着生阻害, 配偶体の成長阻害が著しいことを示唆した. マイクロサイズのプラスチックの着生阻害の影響は, 無機粒子に比べて小さかった. さらに三尾地先の堆積粒子の量と粒径分布から初

期減耗の算出式を Watanabe et al.⁵⁾に従って得た。三尾地先の初期減耗率は約 94.2%であり、野島では 54.7%と算出された。両者の値の間に海藻群落が形成されるか否かの閾値があると考えられた。

海藻群落の再生場所として、三尾地先の海藻礁を選定した。数値実験の結果、三尾地先の照度消散係数は約 0.3 m^{-1} であることから、三尾地先のアラメ群落再生には 3m が適しており、カジメでは 4-6 m が適していると考えられた。当該海域へ幼孢子体を移植したところ、6 月まで順調な成長が確認された。この海域の海藻群落の荒廃は再生産の阻害にあることが確認された。

このことから、幼孢子体を移植することで群落の再生の可能性が示唆された。しかしながら、7-8 月には台風、高水温、食害によると思われる要因で消失した。越夏のための工夫が必要である。

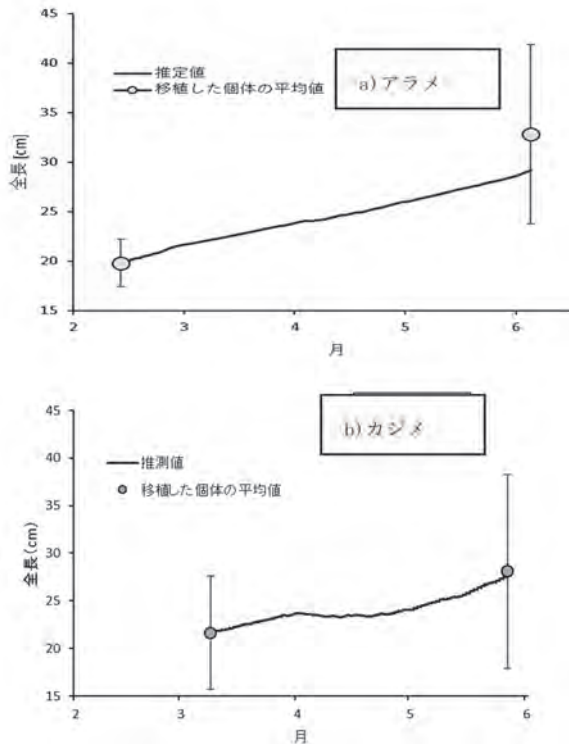


図-2 アラメおよびカジメ孢子体の成長と数値実験の比較

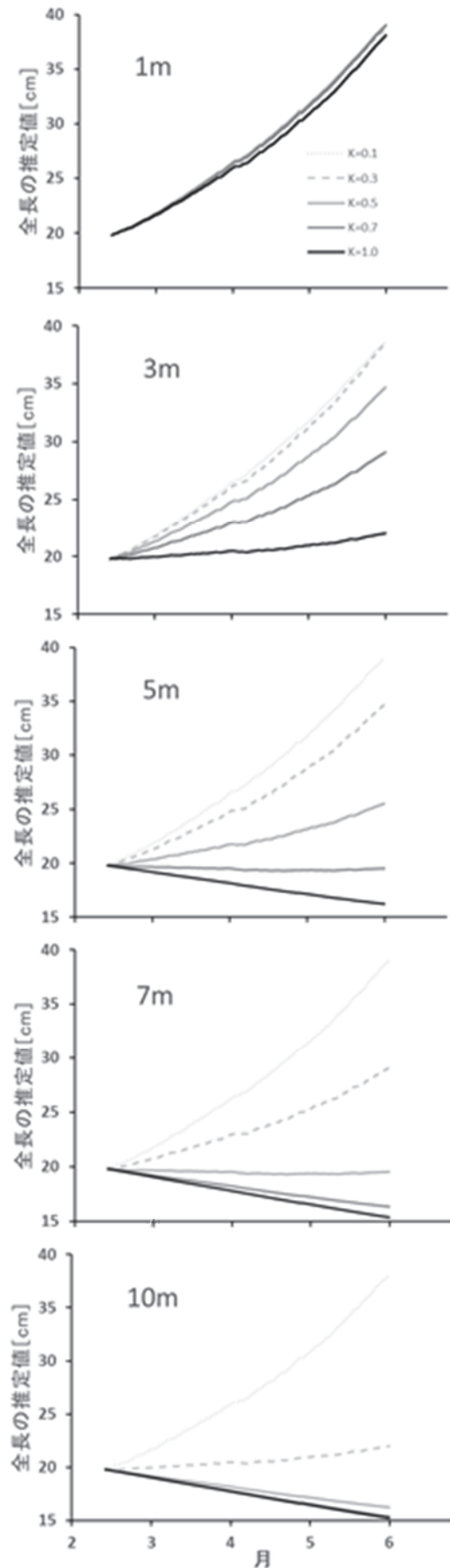


図-3 各水深における濁りの変化がカジメ幼孢子体の成長に及ぼす影響

参考文献

- 1) 山下, 田中, 高田, 海洋生態系におけるプラスチックの動態と生物への影響, 日本生態学会誌 66, 51-68, 2016.
- 2) H. Arakawa, K. Shinoda, A. Matsumoto, H. ENDO, Y. Agatsuma, Physical factors of disturbance of marine forest formation off Mio, Kii Peninsula, the Pacific coast of central Japan., Journal of Marine Biology & Oceanography, 3:4 1000135, 2014.
- 3) K. Taniguchi., H. Yamane, K. Sasaki, Y. Agatsuma, and H. Arakawa. Marine afforestation of the kelp *Eisenia bicyclis* in coralline flats by introduction of porous-concrete reefs. Nippon Suisan Gakkaishi. 67, 858-865. 2001,
- 4) 鈴木, 南雲, 珪藻類の採集と光学顕微鏡観察, 植物分類学研究マニュアル 18. 分類 (日本植物分類学会誌) 15: 75-81. 2015.
- 5) H. Watanabe, M. Itoh, A. Matsumoto, H. Arakawa, Effects of sediment influx on the settlement and survival of canopy-forming macrophytes, Scientific reports, 6:18677, 2016.