褐藻類カジメ・ワカメ遊走子の着生率と基質傾斜の関係^{*1}荒川久幸, 森永 勤^{*2}

(1993年11月29日受付)

The Rate of Brown Algal Zoospores Adhered in the Seaweed Substrate in Relation to Gradient of the Substrate

Hisayuki Arakawa^{*2} and Tsutomu Morinaga^{*2}

As one of the studies towards the rehabilitation of the seaweed-bed deteriorated with turbid water, the relationships between the zoospore adhesion of brown algae such as *Ecklonia cava* and *Undaria pinnatifida* and the gradients of the seaweed substrate were investigated.

The rate of adhesion in the filtered sea water was reduced in inverse proportion to the gradients of the substrate almost in a linear fashion. In the turbid water with suspended particles, however, the deviations in rate of adhered zoospores caused by different gradients of the substrate became smaller as the turbidity increased. Furthermore, when the sediments were deposited very slightly on substrate, the rate of zoospore adhesion decreased suddenly, and the adhesion on a substrate having inclination angle became impossible with sediments only as much as 3 mg/cm². When it was considered that the deposited sediments decreased by the inclination of substrate, the larger the gradient was, the larger was the rate of zoospore adhesion. Under sedimentation of 3 mg/cm², the rate of adhesion with a gradient of 90 degrees showed a maximum value. Also, the adhesion of zoospores relates to the flow of water, and exhibited a maximum value with an approximate flow speed of 3 cm/s. Under such circumstances, it was confirmed that the larger its gradient was, the larger was the rate of zoospore adhesion.

キーワード: 褐藻類, 遊走子, 着生, 傾斜

近年, 沿岸の海水は河川からの多量の懸濁粒子の流出によって, 非常に濁ってきている。海中に放出された懸濁粒子は海藻の孢子に大きな影響を及ぼし,¹⁻³⁾ 日本の各地で藻場の荒廃を引き起こしている。藻場はアワビ, サザエなどの摂餌場として, また魚類の産卵場として重要であるため, 濁りで荒廃した藻場を再生することは海の生物環境の保全, 沿岸漁場の高生産化にとって不可欠な事項である。

従来, 藻場再生に関しては, 新たな基質の投入,^{4,5)} 岩礁の爆破,⁶⁾ および雑藻の除去⁷⁾などによる基質の更新・改善が盛んに試みられているが, 効果があり見られないものも多い。これは藻場の基質としてどのような表面形状, 材質および傾斜度がよいのか藻場内の環境条件と関連して, 定量的にわかっていないためである。

本研究では, 濁りで荒廃した藻場の再生に最適な基質の傾斜度を知ることを目的として, 遊走子の着生数と基質傾斜の角度との間にはどのような関係があるのか, この関係は懸濁粒子や堆積粒子でどう変わるのか, さらに, 流れがある場合はどのように変化するかについて

調べた。

実験方法および実験装置

遊走子は, 外房総の洲ノ崎, 白浜, および小湊地先で採取したカジメおよびワカメを1~2時間陰干した後, ろ過海水に浸して放出させた。遊走子液の濃度は顕微鏡で計数し, カジメで約20万個/ml, ワカメで約50万個/mlとした。

懸濁および堆積に用いた粒子は粘土鉱物カオリナイトである。懸濁水にはろ過海水 (MILLIPORE LIFE GARD FILTER; CP15) にカオリナイトを懸濁させ, 1時間放置後の懸濁状態の安定した上澄みを用いた。懸濁水の粒子数をコーンターカウンタで計数すると, 懸濁粒子の平均粒径は2.3 μmであった。懸濁水の濁り濃度はろ過海水で希釈して, 懸濁物乾重量(SS)が10, 20, および50 mg/lの3段階となるように調整した。粒子の基質上への堆積は, ろ過海水にカオリナイト粒子を種々の濃度で懸濁させ, その中にスライドグラスを入れ, 10時間放置することによって行った。堆積粒子の平均粒径は

^{*1} 海中の濁りの藻場への影響—IV (Influence on Seaweedbed Exerted by Suspended Matter—IV).

^{*2} 東京水産大学海洋生産学科 (Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

6.0 μm であり、懸濁粒子のそれより大きかった。

実験は流れの無い状態と有る状態について以下のように行った。流れの無い状態では、円筒形水槽（直径 58 cm, 高さ 45 cm）の底面にスライドガラスを種々の傾斜角（0, 15, 30, 45, 60, 75, および 90°）で設置し、ろ過海水および種々の濃度の懸濁海水を満たした。遊走子液 500 ml（約 10 万個/ml）を水面より注入し、12 時間放置した後スライドガラスを取り出し、ろ過海水で洗浄後、着生した遊走子の数を顕微鏡で計数した。

流れの有る状態に関しては、止水で基質を動かしたとき、その基質の動く速さが海水の流れる速さに見立てられると考え、Fig. 1 のような装置を作製した。円筒形水槽（直径 58 cm, 高さ 45 cm）の底に長方形（縦 25 cm, 横 10 cm）の板（回転板）を設置した。回転板はモータの動力によって一定周期で回転させた。回転板の上面にスライドガラスを固定し、水槽内にろ過海水を満たした。

Fig. 1. Sketch of experimental apparatus for measuring the number of adhesive zoospores under the current condition.

遊走子液 500 ml を水面より静かに投入し、30 分後スライドガラスを取り出し軽く洗浄した後、顕微鏡で着生した遊走子の数を計数した。

結 果

遊走子の着生率と基質の傾斜度との関係 ろ過海水中に放出された遊走子は遊泳しながら沈降し、基質に到達すると間もなく着生した。このとき、水平基質（傾斜角 0°）への着生密度はカジメで約 1500 個/cm²、ワカメで約 5800 個/cm² であった。これに対し、基質を傾斜させた場合の着生は次のようであった（Fig. 2）。水平基質（傾斜角 0°）の着生密度を 100 とすると、カジメ遊走子の着生率は 45° で 67.6% となり、90° で 27.4% となった。ワカメ遊走子の場合では、45° で 67.0%、90° で 31.0% となった。どちらの遊走子の場合も基質の傾斜度の増加に対して、着生率はほぼ直線的に減少した。

懸濁粒子の影響 次に海水中に粒子が増加すると、着生率と基質の傾斜度の関係は以下ようになった。Fig. 3 にカジメ遊走子の着生率と基質の傾斜度との関係をろ過海水、10, 20, および 50 mg/l の濁り濃度の海水について示した。着生率はろ過海水中の水平基質上の着生密度を 100 として表した。

ろ過海水中の場合に対して、懸濁海水中の着生率は濁り濃度の増加に伴って低下した。基質の傾斜度に対する着生率の減少傾向は濁り濃度に関わらず直線的であった。しかし、その直線の傾きは濁り濃度の増加にともない小さくなった。すなわち、濁り濃度が高くなると基質傾斜度の違いによる着生率の差が小さくなることがわ

Fig. 2. Relationship between the angle of substrate and the rate of zoospore adhesion in filtered sea water. The rate of zoospore adhesion to 0 degree substrate is taken to be 100%. Symbol ● stands for the mean value for every 10 experiments. Vertical bars indicate the standard deviation.

かった。

堆積粒子の影響 前報²⁾において、水平基質の遊走子の着生率と堆積粒子量との関係は、例えばカジメで

Fig. 3. Relationship between the angle of substrate and the rate of zoospore (*Ecklonia cava*) adhesion in sea water suspended particles.

The rate of adhesion to 0° substrate in filtered sea water is taken to be 100%. Symbols ○, ●, ▲, and ■ indicate the rate of zoospore adhesion in filtered sea water and those in 10 mg/l, 20 mg/l, and 50 mg/l kaolinite water, respectively. The numbers of data in filtered water and turbidity waters mentioned above are 10 and 5.

$I_{re} = 100 \exp(-2.98 q)$ のように表された。ここで、 I_{re} はカジメ遊走子の着生率 (堆積粒子の有無における着生密度の割合 (%)) であり、 q は堆積粒子量 (mg/cm^2) である。すなわち、遊走子の着生率は基質上の堆積粒子量のわずかな増加に伴い、著しく低下することがわかった。

これに対し、堆積粒子のある状態で基質が傾斜している場合、その基質への着生率は次のようになると考えた。堆積粒子による遊走子の着生への影響が、基質の傾斜に関わらず同一であると仮定すると、堆積粒子のある傾斜した基質への着生率は、堆積粒子のある状態での水平基質への着生率に、傾斜した基質への着生率 (Fig. 2 参照) を乗じることで算出することができる。

Fig. 4 に各傾斜度の基質への着生率を 0, 0.5, 1.0, および $3.0 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の堆積量別に示した。着生率は堆積の無い状態の水平基質への着生密度を 100 として表した。着生率は粒子のわずかな堆積で著しく減少し、堆積粒子の増加に伴って傾斜度の違いによる着生率の差が見られなくなった。 $3.0 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の堆積量での着生はどの傾斜でもほとんど見られなかった。

しかし、実際の海域での粒子の堆積は、基質の傾斜度が大きくなるほど困難になると考えられる。堆積粒子量と基質の傾斜度との関係を調べてみると、堆積粒子量は傾斜度の増加とともに COSINE 曲線に従って減少した。すなわち、水平基質上に $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の粒子が堆積する場合、各傾斜度の堆積粒子量は 30° で約 $2.6 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 60° で約 $1.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ であり、 90° ではほとんど皆無であった。そこで、基質の傾斜度が大きくなることによる堆積粒子量の減少を考え合わせて、基質上に堆積粒子のある状態

Fig. 4. Comparison of the rate of zoospore adhesion in different quantities of sediment conditions.

The rate is taken with the adhesion to 0° substrate with no sediments as 100%. Symbols ○, ●, ▲, and ■ show the rate of zoospore adhesion on the baseplate with no sediments and those with $0.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$, $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ and $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ deposited kaolinite, respectively.

Fig. 5. The rate of zoospore adhesion in different quantities of sediment conditions in consideration of decreasing sediment by inclination of substrate.

The rate is taken with the adhesion to 0° substrate with no sediments as 100%. Symbols ○, ●, ▲, and ■ show the rate of zoospore adhesion on the horizontally flat baseplate with no sediments and those with 0.5 mg/cm², 1 mg/cm², and 3 mg/cm² deposited kaolinite, respectively.

の着生率を算出してみた。

Fig. 5 に基質傾斜による堆積粒子量の減少を考慮した基質傾斜度と着生率との関係を示した。○は堆積粒子の無い場合の着生率であり、Fig. 2 とそれぞれ対応している。また、●, ▲, および■はそれぞれ水平基質上（傾斜角 0°）に 0.5, 1.0, および 3.0 mg/cm² の堆積量の場合である。

堆積の無い場合のカジメ遊走子の着生率は、基質の傾斜度の増加に伴い直線的に減少した。これに対し、水平基質（傾斜角 0°）上に 0.5 mg/cm² の堆積量の場合の着生率は、各傾斜度において約 25% 前後に集中しており、傾斜度による着生率の差がみられなくなった。さらに水平基質上への堆積量が 3 mg/cm² に増加すると、傾斜度の大きいほど着生率が高くなることがわかった。これらのことはワカメ遊走子の場合でも同様にみられた。

これらのことから、流れの無いところで最も着生率の高くなる基質傾斜度は、海中懸濁粒子量と基質上の堆積粒子量によって変化することがわかった。

流水の影響 流れの無い状態の着生率は基質の傾斜度の増加に対してほぼ直線的に減少することがわかった。さらに流れの有る状態について調べた。

まず、流水中での水平基質（傾斜角 0°）への着生率は次のようであった (Fig. 6)。流れの無い場合（流速 0 cm/s）の遊走子の着生密度を 100 とすると、流速の増加に伴って着生率が増加し、約 3 cm/s で極大となった。さらに流れが速くなると、着生率は急激に低下し、25 cm/s

以上の流れでは全く着生できなかった。流速と着生率の関係はカジメとワカメでほとんど同様であった。

次に、流れ（約 3 cm/s）の有る状態で基質傾斜角を 45°, 90° とすると着生率がどのように変化するか調べた。流れの有る状態での水平基質の着生密度を 100 とすると、着生率は傾斜角 45° で平均 105% となり、90° で平均 144% となった。すなわち、流れの有る状態では水平基質より、傾斜の大きな基質ほど着生率の増加する傾向がみられた。

考 察

本報では遊走子の基質着生にとってどんな基質の傾斜度がよいのか調べた。その結果、ろ過海水中での着生率は水平基質（傾斜角 0°）で最も高く、傾斜の増大に伴って直線的に減少し、鉛直基質（傾斜角 90°）では水平基質の約 1/4 となった。懸濁海水中では、濁り濃度の増加に伴って着生率が低下した。着生率の低下は傾斜角の小さい基質ほど大きかった。すなわち、水中の濁り粒子の増加によって水平基質と鉛直基質との着生率の差が小さくなった。また、堆積粒子のある場合、着生率は粒子のわずかな堆積で著しく減少し、3 mg/cm² の堆積量ではどの傾斜角でも皆無となった。基質傾斜による粒子の積もりにくさを考え合わせた場合、水平基質上へ 0.5 mg/cm² 積もるところでは基質傾斜度の違いによる着生率の差はみられなくなり、水平基質上に 3 mg/cm² 積もるところでは基質傾斜度が大きいほど着生率は増加した。さらに

Fig. 6. Relationship between the velocity of current and the rate of zoospore adhesion to 0° substrate in running sea water.

The rate of zoospore adhesion to horizontally flat substrate in filtered sea water is taken to be 100%. Symbol ● stands for the mean value for every 4 experiments. Vertical bars indicate the standard deviation.

流れの有る状態での着生率を調べた結果、着生率の最も高い流速は、水平基質で約 3 cm/s であった。また、流れに対して大きな傾斜度をもつ基質ほど多く着生する傾向がみられた。

基質の傾斜度と海藻胞子の着生との関連を調べたものには沢田ら⁹⁾および Okuda *et al.*⁹⁾の研究がある。沢田ら⁹⁾は紅藻キブリトグサ、Okuda *et al.*⁹⁾は褐藻ヒバマタ目の 10 種について、それぞれ各傾斜度の基質上で着生形態や移動距離を観察している。その結果、傾斜した基質上へ沈降してきたこれらの胞子の着生形態は、接触後まもなく着生するものや斜面を滑り動いた後着生するものなどがみられ、種類によって異なっていたと述べている。本実験で用いたカジメ・ワカメ遊走子の大きさは約 5 μm と非常に小さく、また遊走子は基質に到達するとまもなく着生するといわれている。¹⁰⁾このことにより、一度基質に接触した遊走子が基質の斜面を滑り動き、基質から落ちることはないと考えられる。また、本報告では傾斜した基質へ堆積粒子がある状態での着生率の算出について、堆積粒子による遊走子の着生への影響が基質

の傾斜に関わらず同一であると仮定した。このことについてはさらに検討する必要がある。

一方、流れの有る状態での着生に関しては、Charters *et al.*¹¹⁾ 飯倉ら¹²⁾ および杜多^{13, 14)}の研究がある。杜多¹⁴⁾はフサコケムシ幼生、飯倉ら¹²⁾はアカモク幼胚を用いて流速と着生密度の関連を明らかにしている。これらの結果では、一定の流速で着生数がピークを示し、その後減少するという現象がみられている。これは本実験でも同様に観察された。杜多はこの現象を、流速に対する幼生の基質への Flux と基質に接触の後固着するまでの残存率の積で求めると説明している。また、杜多¹³⁾および Charters *et al.*¹¹⁾は振動流速の幼胚着生への影響を報告している。ワカメなどの遊走子の着生は相当に強固である¹⁰⁾といわれているが、振動流速と着生した遊走子の剝離の問題も今後の課題である。

終わりに、本報の成果に関して現場海域の基質の傾斜角と海藻の着生相の関係について言及する。例えば、今野¹⁵⁾は千葉県小湊地先で岩面の傾斜度と海藻分布の関連を調べ、カジメ・アラメなどの大型海藻は基質の傾斜度が増すほど優占度が低下すると報告している。また、寺脇¹⁶⁾は神奈川県三浦半島小田和湾湾口部に実験用基盤を投入し、カジメ幼体の入植と基盤の表面形状の関連について検討した。その結果、カジメ幼体の入植数は角度 0~45°の範囲では少ないが、角度 60°以上になると角度が大きいくほど増加する傾向が認められ、角度 120°で最も多かったと述べている。すなわち、基質の傾斜角と海藻の着生相の関連は、海域が変わるだけで全く逆の現象がみられている。このことは現場海域の環境要因のうち、海中光量や流れなどの違いによるものもあるだろうが、海水の濁りや堆積粒子量の多寡による影響も関係しているのではないかと考えられる。

今後、藻場の再生・造成を行う場合には、現場海域の濁りや堆積粒子量、さらには流れの強さなどを考慮して基質の傾斜を決める必要がある。

謝 辞

本研究の実験に対しご助力下さった東京水産大学坂田実験実習場の小池康之主任ならびに技官の皆様へ深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) 荒川久幸, 松生 治: 褐藻類カジメ・ワカメの遊走子の沈降速度および基質着生に及ぼす海中懸濁粒子の影響. 日水誌, **56**, 1741-1748 (1990).
- 2) 荒川久幸, 松生 治: 褐藻類ワカメ・カジメ遊走子の着生と成長, 生残および成熟に及ぼす海底堆積粒子の影響. 日水誌, **58**, 619-625 (1992).
- 3) 荒川久幸, 森永 勲: 褐藻類ワカメ・カジメ遊走子群の分散へ及ぼす海中懸濁粒子の影響. 日水誌, **60**, 61-64 (1994).

- 4) 川嶋昭二: コンブ海中林の造成. 水産の研究, **2**(4), 101-105 (1983).
- 5) 船野 隆: 噴火湾沿岸伊達市におけるマコンブの生態およびコンクリートブロック, 割石によるコンブ礁造成. 第2報. 北海道水産試験場報告, **23**, 9-52 (1981).
- 6) 三本文興, 金沢宏重: こんぶの増殖に関する調査. 青森県陸奥湾水産増殖研究所業務報告書, **9**, 139-198 (1967).
- 7) 石川政雄, 船野 隆, 工藤敬司: コンクリートブロック礁の稚藻除去について. 北海道水産試験場月報, **26**(7), 13-20 (1969).
- 8) 沢田武男, 古賀直, 内山賛平: 紅藻キブライトグサの果胞子の付着について. 九州農学芸誌, **26**, 223-226 (1972).
- 9) T. Okuda, H. Karei, and M. Yamada: Settlement of germlings in ten fucalean species. *Hydrobiologia*, **116/117**, 413-418 (1984).
- 10) 須藤俊造: 昆布科植物の遊走子の放出, 運動並びに着生. 日水誌, **13**, 123-128 (1948).
- 11) A. C. Charters, M. Neushul, and D. Coon: Effects of water motion on algal spore attachment. In Proc. Seventh Int. Seaweed symp., Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 1972, pp. 243-247.
- 12) 飯倉敏弘, 杜多 哲, 北村章二: 藻場の水理と物質の集積. 昭和59年度「近海漁業資源の家魚化システムの開発に関する総合研究」プログレスレポート III-6, 103-112 (1985).
- 13) 杜多 哲: 浮遊幼生の分散におよぼす流動環境の影響とその制御. 養殖研報, **16**, 1-82 (1989).
- 14) 杜多 哲: 幼生の着生におよぼす境界層流れの影響. 月刊海洋, **24**, 464-469 (1992).
- 15) 今野敏徳: 漸深帯固着生物の分布に及ぼす岩面傾斜度の影響. 東京水産大学研究報告, **72**, 99-109 (1985).
- 16) 寺脇利信: カジメ幼体の入植と人工基盤の表面形状. 電力中央研究所研究報告, 海中林造成技術の基礎的検討第2報, 1-26 (1988).