

食卓から青海苔が消える？ 海水温変動とスジアオノリの成長の関係

●文：平岡 雅規（高知大学総合研究センター海洋生物研究教育施設）



2019年は、記録的な暖冬と猛暑、大型台風による被害など、地球温暖化の影響が色濃く表れた年でした。地球温暖化の進行により、海にも様々な影響が出ており、なかでも冬の低水温下で成長する海藻への影響は大きいといわれています。海藻を多く食べる日本人にとって、これは一大事です。本号では、お好み焼きに欠かせない青海苔の研究を行っている高知大学総合研究センター海洋生物研究教育施設の平岡雅規准教授に、スジアオノリと海水温の関係について執筆いただきました。

図1 四万十川汽水域で冬に繁茂するスジアオノリ

四万十川のスジアオノリ

温暖化が進むと青海苔が穫れなくなる。そう考え始めたのは2005年頃だった。最後の清流といわれる四万十川の河口に自生するスジアオノリを収穫して天日干しする風景は、高知の冬の風物詩になっている(図1、図2)。青海苔にはボウアオノリ、ウスバアオノリなど多くの種類があるが、四万十川のスジアオノリは香りがよく最高級品として扱われている。スジアオノリは水温が下がる12月から4月頃まで群落を形成するが(図3)、夏には藻体は見えなくなる。冬から春の1シーズンで10～20トンの乾燥品が生産され、天然採取では全国一の生産量であった。しかし、2005年から3年連続で3トンを超える不作となり、その頃から不作が頻発し、減少の一途をたどることになる(図4)。この3年連続不作で、四万十市から高知大学へ原因究明の要望があり、なぜスジアオノリの収穫量が減ったのか?を考え始めた。地元漁業者からは、山からの栄養が少なくなった、胞子の供給が少なくなった、暖冬のせい、農薬使用や護岸工事が原因などの意見が聞かれた。

不作の原因を探る前に、スジアオノリの個体発生を知っておく必要がある。スジアオノリは胞子で増殖する。胞子は鞭毛をもっており、それを使って泳ぎ回り、適当な場所に着生する。着生した胞子は細胞分裂して細胞数を増やし、多細胞の藻体へと成長する。藻体は細長く、枝分かれを繰り返す形状になるが、部位による分化はほとんどみられず、藻体を岩



図2 四万十川河口域でのスジアオノリ为天日干し



図3 川底に生育するスジアオノリ

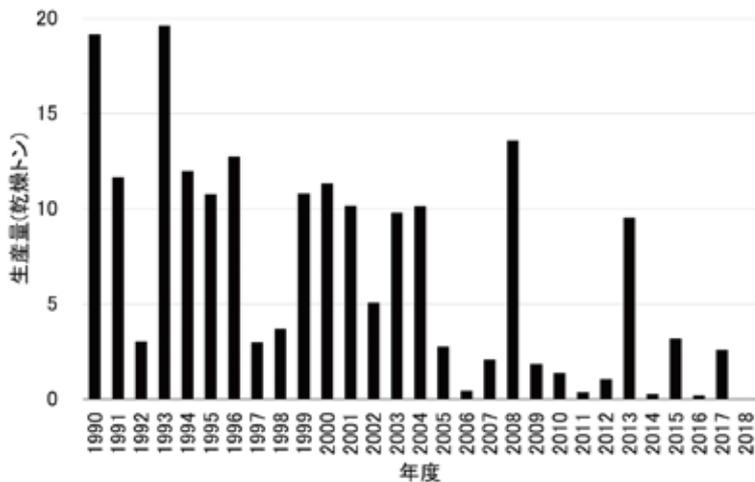


図4 四万十川汽水域のスジアオノリ生産量(四万十市調べ)



図5 スジアオノリの藻体標本

スジアオノリ *Ulva prolifera* はデンマークのロラン島で採集され1778年に初めて報告された。しかし、基準となる標本(ホロタイプ)が消失しているので、デンマーク産のスジアオノリを高知大学で培養したこの標本がコペンハーゲン大学植物園に所蔵されている

などの基質につなぎとめている小さな付着部位を除いては、ほぼ均一な体細胞で構成されている(図5)。大きな藻体では長さが1mを超える。胞子は藻体の先端部分の体細胞で造られる(図6)。胞子を造るための特別な細胞や器官が分化するわけではなく、体細胞がそのまま胞子を造り始める。胞子形成を開始すると、細胞質が分裂して分割され、2日後には数十個の胞子が放出される(図7)。胞子が泳ぎ出した後の、中身のなくなった細胞すなわち細胞壁の殻は藻体から脱落する。したがって、藻体は胞子を造るたびに先端部分が脱落し、やがて藻体全体が消失する。スジアオノリは以上のような藻体の成長と胞子の拡散を繰り返している。このことから、収穫量の減少は、1. 胞子の供給量が減った。2. 胞子はあるが藻体が成長しなかった。のどちらかと考えられた。そこで胞子の供給量と藻体の成長が実際にどう変動しているのかを調査した。

胞子の供給量

スジアオノリは川の河口に生育するので淡水で育つイメージがあるかもしれない。実際は、塩分のない淡水では育つことができず、必ず海水が混ざった汽水域で繁茂する。四万十川汽水域では満潮時に河口から最大7~8km上流まで海水が流入する上げ潮と、干潮時に山からの淡水が海水を押し戻す下げ潮がおよそ6時間の周期で起こる。そのため汽水域は海水と淡水が複雑に混じりあう環境変動の激しい場所になっている。この汽水域の上流部で、胞子の供給量を調べた。コンクリートブロックに固定したスライドガラス(ガラス板)を川底に沈める(図8)。そして、48時間後にガラス板

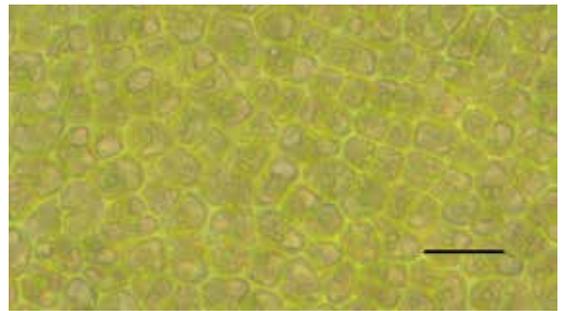


図6 スジアオノリの体細胞 スケールは20μm

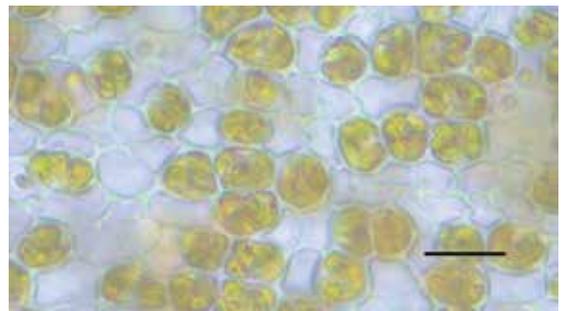


図7 スジアオノリの胞子形成細胞

胞子をまだ放出していない細胞と、胞子を放出して空になった細胞がある。図6は同じ細胞の2日前のまだ胞子を形成していない状態。スケールは20μm



図8 胞子供給量調査でガラス板を川底に沈めて設置する様子

を引き上げて研究室に持ち帰り、アオノリがよく成長する培養条件に置く。すると1週間の培養でガラス板上にアオノリの芽生えが顕微鏡で確認でき、その個数を計測すれば単位面積当たりの胞子供給量を算出できる。スジアオノリ群落が見え始める前の11月に、ガラス板を入れては引き上げる作業を連続して2週間行った。その結果、2日間毎に1cm²当たり平均160個の胞子が着生することが分かった。現場の川底では日々累積して胞子が着生してくるので、かなりの供給量になる。調査した年は2012年で、収穫量は少なく1トン程度であった(図4)。大量の胞子が供給されていても不作になることが確認できた。それにしても群落が見えない時期に、大量の胞子はどこからくるのだろうか？

藻体の成長と海水温

実験室でスジアオノリの培養試験をすると、30℃まで水温が高くなるほど藻体は速く伸びる(図9)。しかし、水温が高くなると胞子の放出も早く起こる。藻体の大きさは、成長量から胞子放出による脱落量を差し引いて決まる。高温では脱落量が大きいため、藻体はすばやく成長してもすぐに胞子を放出して小さくなってしまふ。20℃を超える水温では大きく成長できないのである。培養試験に合致して、天然群落が目に見えて繁茂しだすのは、ちょうど20℃を下回り始めた頃である。研究室の卒業生で、四万十市で働く辻祐人君は、2週間毎にスジアオノリの藻長を計測する調査を2014年から実施し、現在も継続している。それによると、芽生えが伸びだす秋から冬に高水温だと藻体が1~2cmの小さいサイズでも胞子を放出して消えてしまふが、低水温だと胞子放出を経験しないまま大きく育つことを観察した。高水温だとせつかく伸び始めた藻体が、ふりだしに戻ってまた胞子から発生のやり直しをしていることが分かった(図10)。「群落が見えない時期に、大量の胞子はどこからくるのか?」それは、無数の小さい芽生えが胞子を絶えず放出し、すばやく再生産のサイクルを回して、その胞子がやってくる、ということになる。漁業者は棒の先端に爪のついた道具で青海苔を採取する。長く伸びた藻体でないと収穫できない。小さな

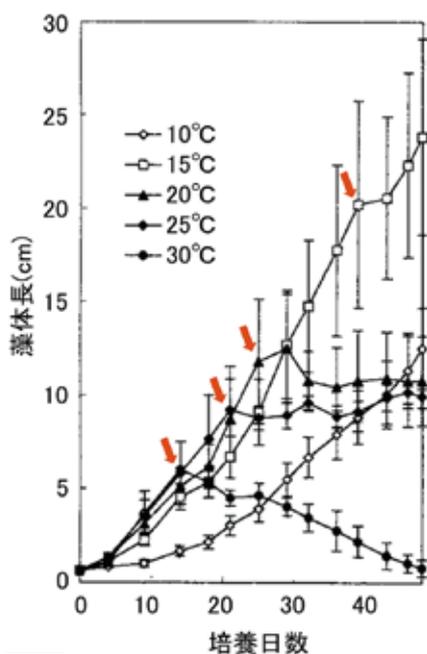


図9

10~30℃で培養したスジアオノリの藻体長の経時変化(平均±標準偏差、N=10-12)

赤矢印は胞子形成が観察された初日を示す。20~30℃では、胞子形成が始まると、胞子放出による脱落量が成長量とほぼ同じか上回るため、藻体は伸びない。15℃では、成長量が脱落量を上回るので伸び続ける。10℃では、胞子形成は観察されず、ゆっくりと伸び続ける

個体ばかりだと、収穫量が減るのである。世界全体の海面水温の平均上昇率が0.55℃/100年であるのに対し、四国沖は1.23℃/100年で、2倍以上の上昇率で温暖化が進んでいる。この傾向が今後も続くなら、不作も続いていくだろう。

黄海で爆発的大増殖

四万十川のアオノリ不作に悩む頃、中国で信じられないほどのアオノリが大発生しているとの報道があった。2008年夏、北京オリンピックの準備が進む中国沿岸に突如として大量のアオノリが押し寄せてきた(図11)。人工衛星写真から、2~3ヶ月で黄海の中央部を3,500km²覆うまでアオノリが増殖し、海流で運ばれて青島市周辺の沿岸に堆積したことが示されている。青島市はカヌー競技の会場になっていたため、中国政府は1万人を動員し、急いで収集撤去した。その回収量は100万トン以上とされている。これは水分を含んだ湿重量なので、乾燥重量に換算だと10分の1になる。それでも、日本の高級アオノリの年間需要量が200トン程度なのでその500倍にもなる。しかもこの量は沿岸に流れ着いて回収された量なので、実際に黄海で発生した量はさらに膨大だ。このような海藻の大発生をグリーンタイドというが、世界中の都市部に近い内湾で起こっている。日本でも東京湾や大阪湾など全国でアオサのグリーンタイドが発生している。この2008年の黄海のグリーンタイドは世界最大規模とされている。世界にはとんでもないアオノリがあるのだと驚いていたら、中国から調べてほしいと依頼が来た。当時の中国ではアオノリの研究者はほぼ皆無。研究室で高知のアオノリの生態研究で修士号を取得し、帰国していた朱文栄君が中国で唯一のアオノリ研究者だったのかもしれない。彼を通じて、黄海のアオノリを調べることになった。四万十川のスジアオノリと

交雑試験をしてみると、意外にも交雑できて子供ができた。四万十川産スジアオノリと同じ種と判定されたのである。しかし、両者はかなり異なる生態特性をもつ。四万十川産は汽水域で着生して生育し、高水温で胞子を放出するので、夏前には藻体がなくなる。一方、黄海産は海面に浮遊して増殖し、2008年以降も毎年、夏に大発生している。培養試験をしてみると、黄海産は25℃の高温でもほとんど

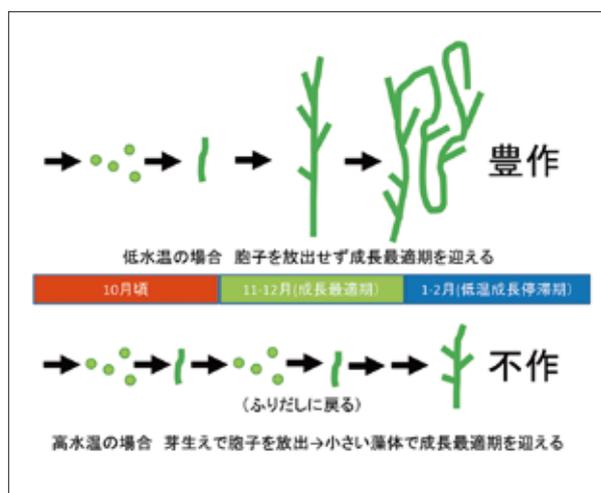


図10 野外観察と培養試験から想定されるスジアオノリの豊作と不作の成長パターン

水温が20℃より下がってくる11~12月に、高水温だと芽生えが胞子を放出して発生をやり直すことになる。低水温だと芽生えがそのまま成長して大きな藻体になる

胞子を造らず、藻体が伸び続けた。日本では北海道から沖縄まで汽水域にスジアオノリが分布しているが、いずれの地域の藻体も20℃を超えると胞子を放出して伸びなくなった。中国沿岸の汽水域のスジアオノリも同様に20℃以上では大きくならない。汽水域のスジアオノリが高水温で伸びないのは、広く共通した生理特性であった。黄海産だけが高水温で成長できる性質をもっていた。黄海産と日本各地のスジアオノリを交雑試験すると、日本海沿岸の個体群と太平洋沿岸の個体群で交雑の反応が少し違っていた。黄海産と日本産の交雑試験をする場合、2通りの組合せを試験することになる。すなわち黄海産の雄×日本産の雌と、黄海産の雌×日本産の雄の組合せである。日本の太平洋沿岸の個体群は黄海産と両方の組合せで子供ができた。しかし、日本海沿岸の個体群は黄海産と一方の組合せでしか子供ができなかった。この結果は、黄海産が日本海の個体群よりも太平洋沿岸の個体群と近縁なことを示している。黄海産は、太平洋沿岸の汽水域で生育するスジアオノリと共通の祖先から進化し、高水温でも藻体が成長して海で大発生する能力を獲得したと予想された。最終的に黄海産は汽水産スジアオノリと区別して、新しい亜種 (*Ulva prolifera* subspecies *qingdaoensis*) として発表した。

海藻の特性を利用しよう

不作が続くと、このままでは四万十川のスジアオノリが絶滅してしまう。という声も聞かれる。しかし、肉眼では見えないものの、膨大な量のスジアオノリの子供たちが汽水域には潜んでいる。そして水温が下がると速やかに姿を現す。彼らは柔軟に生活のかたちを変えている。光合成によってCO₂を集めて作った資源を、個体数を増やすほうに分配するか、それとも個体自身を大きくするほうに分配するか、少し資源分配を変えているだけだ。ヒトは、大きくなった個体を採取して利用してい



図11 黄海で発生するスジアオノリによるグリーンタイド (段維軍さん提供)



図12 高知大学発ベンチャー・合同会社シーベジタブルが運営する青海苔を安定生産するための陸上タンクシステム

るにすぎない。研究を進めると、スジアオノリは遺伝的に多様であることが分かってきた。太平洋系統、日本海系統の他にもいくつか別の系統が見つかる。それらの特性をよく把握すれば有効に利用できる。研究室の博士課程学生・蜂谷潤君は、全国的に激減する青海苔の生産量を補えるように、陸上タンクで安定生産する高知大学発ベンチャーを立ち上げた(図12)。海の近傍に海水井戸を掘って、水温が周年安定している海水を汲み上げ、屋外タンクにかけ流す。そのタンクの中で、よく成長する系統の種苗を日光の下で育てる。大量の種苗は、室内で温度を調整して培養することで繰り返し生産できる。現在では四万十川で収穫されていた量を十分補える規模まで生産できるようになった。ここで使われているスジアオノリの品種は、周年を通じて屋外タンクで1週間に10倍増える。研究室では様々な種類の海藻の成長速度を調べているが、最も高い成長速度をもつ種は徳島県吉野川の汽水域で採取したミナミアオノリだった。この種は毎日3倍以上で増える。1週間だと2,000倍を超える。この成長特性を活用すれば、効率よくCO₂を回収し、自然界で分解可能な生物素材を提供できるだろう。環境変動で生物の量や分布は早いペースで変化していく。それをよく観察して調べ、特性を活かすようにすれば、ヒトはその恩恵にあずかることができる。



平岡 雅規 ひらおかまさのり

高知大学総合研究センター海洋生物研究教育施設・准教授。1967年大阪生まれ。神戸大学で修士号取得後、大学を追い出されてぶらぶらしているところを大野正夫先生に拾われ博士号を取得。専門は、海藻の生殖生理・生態学とその応用。応用研究で自ら予算を稼いで基礎研究を進めるモデルを実践中。