

グリーンタイド

平岡雅規¹, 鳶田智², 吉田吾郎³

はじめに

近年,世界各地の富栄養化した内湾で海藻の大量繁殖が起きており,とりわけアオサ類を中心に緑藻が引き起こす場合が多いので,赤潮 red tide に対比させてこの現象をグリーンタイド green tide と呼んでいる(Fetcher 1996, 図 1)。緑藻の大量繁殖 = グリーンタイドとすると,例えば高知県四万十川河口で密生するスジアオノリもグリーンタイドの範疇に含められてしまい,食用海藻としてのイメージが悪い。このことから,大野(1999)はグリーンタイドを浮遊したアオサ類の大量繁殖と定義し狭義にしている。筆者等はこの定義に従ってグリーンタイドを扱う。グリーンタイドに関する解説書が「アオサの利用と環境修復」と題して 1999 年に刊行されており,アオサの利用方法や環境との関係について詳しく説明されている(能登谷 1999)。本稿ではその内容をフォローしながら国内のその後の研究,特にグリーンタイドを引き起こしているアオサの種類や生態的な特徴を研究史に沿いながら解説する。

研究史

岡村(1921)は浮遊したアオサが沿岸に堆積して腐敗し,衛生上の問題があると指摘している。当時すでにグリーンタイドは問題視されていたようである。この記述は *Ulva pertusa* Kjellman(アナアオサ)の説明文として記載されているので,岡村氏は沿岸で浮遊堆積しているアオサをアナアオサと考えていたとみられる。その後,Arasaki(1984)は高度成長期の 1970 年頃から,日本沿岸の特に瀬戸内海,東京湾,伊勢三河湾など富栄養化が問題となっている工業地帯の浅い海にグリーンタイドが発生していると報告している。種類に関しては,それまでアナアオサが日本各地で優占していたのに,西日本で



図 1. 神奈川県金沢湾のグリーンタイド。

は *U. fasciata* Delile(リボンアオサ),東日本では新種のアオサに置き換わっていると指摘した。外国から工業地帯に入ってくる船舶によりアナアオサとは異なる種類のアオサが運ばれてきて,汚染海域で何らかの要因で大量繁殖したと考察している。次の年には右田(1985)が長崎県大村湾で採集した 1m 以上にもなる浮遊アオサをアナアオサの不稔性変異種として発表している。このアオサ藻体の断片は非常に速い生長速度をもち,2日で2倍の大きさになる。形態的には従来のアナアオサと比較して色が黄緑色であり藻体の厚みが薄い。岩礁域に固着するアナアオサの野性藻体を通気培養すると,通常,縁辺部分から生殖細胞形成(成熟)が起こって組織が脱落し,なかなか大きくなれない。しかし,アナアオサ不稔性変異種はその名の通り,生長しても成熟は起こらない。この変異株はアワビやウニの飼料として,また,栄養塩吸収率が高いことから富栄養化した海域の浄化に役立つと期待され,多くの水産試験場や大学研究室で利用された。そのため,アオサの浮遊藻体はアナアオサの不稔性変異種という考えが広まった。これに対し,高知県浦ノ内湾でアナアオサ不稔性変異種と形態的に一致する薄くて黄緑色の浮遊アオサが大量に繁殖していることを大野(1988)が報告し,このアオサはアナアオサと異なる生理生態特性をもつことを明らかにした。さらに平岡等(1998)は博多湾に大量繁殖する浮遊アオサとアナアオサが異なる種類であることを交雑実験によって確認した。大村湾,浦ノ内湾,博多湾で大量繁殖するアオサ断片は組織形態や生理生態が非常によく似ている。すなわち形態的には薄くて黄緑色,生理生態的には温暖海域に生育し,成熟がほとんど起こらず,生長率が高いことで一致する。西日本でグリーンタイドを引き起こす種類はリボンアオサであると新崎氏は結論づけたが果たしてそうなのだろうか?また,一つの湾のグリーンタイドはただ一種類のアオサ種によって引き起こされるのであろうか?

複数の種によるグリーンタイド

博多湾と広島湾では少なくとも 2 種類のアオサがグリーンタイドを構成していることが最近の研究でわかってきた。上ノ菌(2000)は博多湾和白干潟で,大野氏の研究グループが発表したアナアオサと交雑しない浮遊アオサの他にアナアオサと交雑する浮遊アオサも採集した。この 2 型の浮遊アオ

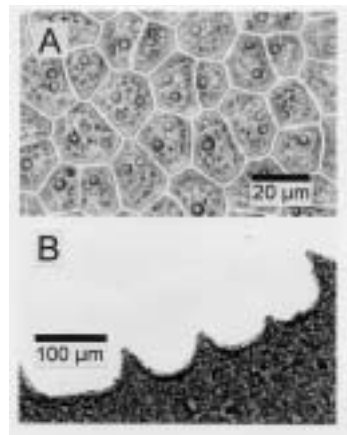


図2. *Ulva* sp. の顕微鏡写真。A:細胞表面観。葉緑体が細胞全面に広がり、1~3個のピレノイドが確認できる。細胞は比較的角張った形である。B:藻体縁辺部分。微細な鋸歯が確認できる。鋸歯がみられない場合もある。

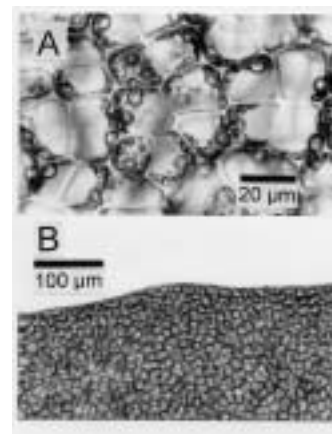


図3. アナアオサ型の顕微鏡写真。A:細胞表面観。葉緑体が偏って存在する。1~3個のピレノイドが確認できるが、小さな粒子に囲まれて確認できない場合も多い。B:藻体縁辺部分。*Ulva* sp. のような微細な鋸歯を持たない。

サは形態的な特徴でも異なっており、前者は藻体縁辺部に光学顕微鏡で確認できる小さな鋸歯をもつ場合が多く、細胞が多角形で葉緑体が細胞内に広がって配置する(図2, 以下 *Ulva* sp.)。後者は鋸歯をもたず、細胞に丸みがあり葉緑体が偏って配置する(図3)。後者はアナアオサの形態の特徴とよく一致しており、固着型のアナアオサと交雑することからアナアオサの浮遊断片と考えられた(以下アナアオサ型)。さらに、2型のアオサ断片は季節消長が異なり、*Ulva* sp. は夏から晩秋、アナアオサ型は冬から初夏にかけて繁茂する。同様の現象は広島湾宮島周辺のグリーンタイドでも見られた。図4には1~3ヶ月毎に採集した浮遊アオサの *Ulva* sp. とアナアオサ型の比率を示している。*Ulva* sp. は夏から秋にかけて頻度が増し、アナアオサ型は冬から初夏に多い。岩礁域に固着するアナアオサは冬から初夏にかけて繁茂する。25℃を超える水温でアナアオサは成熟して藻体を流出させ大きく生長できない。一方、*Ulva* sp. のほうは高水温でもよく生長し成熟も起きにくいので夏の高温期に優占できるであろう。高知県浦ノ内湾では博多湾と広島湾で見られるアナアオサ型は採集されず、*Ulva* sp. のみが採集される。大野(1988)は浦ノ内湾でアオサのバイオマスの季節変化を調査しているが、アナアオサが最盛期を迎える春にはほとんど繁殖せず、夏から秋にかけて大発生する。関東地方では東京湾に面した神奈川県金沢湾でバイオマス調査が行われており、浮遊アオサが4~6月に多く見られる(能登谷1999)。この浮遊アオサの主要構成種は形態、交雑実験からアナアオサであることがわかっている(平

岡2000)。以上をまとめると4つの湾を種構成・バイオマスの面から3つのタイプに分けられる(図5)。グリーンタイドの発生様式を考察すれば、暖海域では *Ulva* sp. が優占して夏から秋に大量繁殖し、暖温海域では2種類の混合が起こって周年浮遊アオサが繁茂し、やや低温の温海域ではアナアオサが優占して春から初夏に最盛期となる。もちろん、これは大まかな概観である。グリーンタイドは浮遊しているアオサ断片で構成されるため不安定で、台風などで打ち上げられたり流されたりして突然消えてしまうこともあり、毎年同じようなバイオマス変化が見られるとはかぎらない。また、主要構成種はアナアオサと *Ulva* sp. であるが、*Ulva* sp. として述べてきた分類群は複数のアオサ種を含んでいることがDNA解析から明らかになりはじめた。吉崎(1998)は東京湾千葉港で少なくとも5種類の浮遊アオサを識別し、鋸歯のあるアオサに3種類あるとしている。近年、地球温暖化が問題になり、海水温度の上昇に伴い海藻の生育にも影響がでてきているようである(芹澤等2000)。生育環境に適合したアオサ種が勢力を増し、主要構成種が入れ替わってしまうことも考えられる。

塩基配列分析

アオサ類の系統比較、種分類ではITS配列の塩基配列比較で行われることが主流となっており、データも蓄積されてきている(Blomster 2000)。各地の浮遊アオサについてITS塩基配列を調べて系統解析を行った。フランスでは *U. armoricana* Dion *et al.*、オランダでは *U. scandinavica* Bliding がグリーンタイドを引き起こしているとされる(Coat *et al.* 1998、

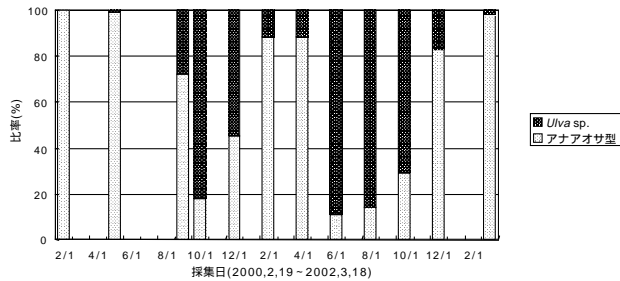


図4. 広島湾宮島における *Ulva* sp. とアナアオサ型の頻度の季節変化。1 ~ 3ヶ月毎に119 ~ 170のアオサ断片を採集して光学顕微鏡による形態観察を行い、種類を判別した。

Malta *et al.* 1999)。それらの塩基配列データも加えた。その結果を図6(系統図)に示す。各地から採集された藻体のうち、縁辺部に顕微鏡的な鋸歯がなく細胞に丸みがあり表面観で葉緑体が偏っているアナアオサ型の浮遊アオサはアナアオサの塩基配列とほとんど同じであった。一方、*Ulva* sp. として扱ってきた、しばしば顕微鏡的な鋸歯を持ち、細胞に角張る傾向があり、葉緑体が細胞全体に広がって存在する浮遊アオサには、少なくとも3つの分類群が含まれていることが明らかになった。フランスの浮遊アオサとして報告されている *U. armoricana* と全く同じITS配列をもつ *U. armoricana* 型、リボンアオサと全く同じITS配列をもつリボンアオサ型、*U. reticulata* Forsskål(アミアオサ)に近縁なアミアオサ型である。最後のアミアオサ型の浮遊アオサは、ITS領域の分子系統樹においてアミアオサとは異なる2つのクレードを形成した。これらの種に関する問題は今後の課題である。リボンアオサとアミアオサは鋸歯があるアオサであることが知られており、温暖海域が生息域である。これらの南方種が主に西日本でグリーンタイドを引き起こしている。驚くべきことにそれら南方種とは別にヨーロッパの浮遊アオサと近縁であると考えられる浮遊アオサも広島と横浜のグリーンタイドに混在していた。この *U. armoricana* 型のアオサ種が昔から日本に自生していたのかどうかかわからないが、少なくともこれまで報告はない。新崎(1984)が考えたように外国から船に乗って運ばれてきたかもしれない。塩基配列比較から日本でみられる浮遊アオサは大きく4つの分類群、アナアオサ型、*U. armoricana* 型、リボンアオサ型、アミアオサ型に分けられるが、浮遊断片の形態観察だけで見分けることは非常に難しい。そもそも浮遊断片ではなく付着根を持っているアオサ藻体でさえ、分類は困難である。アオサ類の形態は種内変異が大きく、種

間変異が小さいのである。浮遊アオサを同定するためには、DNA分析または発生形態の観察(培養実験)、交雑実験などを行う必要があるだろう。

将来の展望

グリーンタイドの生態的特徴は、種類の特定とそれぞれの種の生理特性をつかむことで次第に明らかになってきている。生理特性の異なる複数のアオサ種が同じ海域で発生していることがわかってきたのは最近の成果である。今後

も学術的な観点からグリーンタイドの研究は進んでゆくであろう。一方、環境問題としてグリーンタイドは実生活に切実に結びついている。グリーンタイドは比較的波静かな内湾の富栄養化した海域で発生しており、堆積して腐敗したアオサが異臭を放つ、海水浴の邪魔になる、景観が損なわれるといった問題から早急に対策を考える必要がある。アオサの場合、微細なプランクトンの大量発生である赤潮と比べると網などで回収でき、一カ所に集めることが容易である。また、浜に打ちあがっているものも拾い集めることができる。収集は容易であるが、収集されたアオサの処理が問題である。三河湾の海藻加工業者らは4月から12月の間、天然海域から浮遊アオサを回収し日量平均20トン乾燥処理して食用の「青のり粉」1.8 ~ 2.0トンを生産している(能登谷1999)。年間500トン程度の生産がある計算になり、キロ単価が500円としても2億5千万円の売り上げと推定される。海で浮遊している汚れの少ないアオサの利用として注目に値する。一方、海岸に堆積しているアオサは泥にまみれており、食用にするには大変な洗浄作業が必要となる。これらのアオサの利用には、微生物の分解作用を利用し二枚貝や海産微小動物の餌となる粒子(デトリタス)に変換する技術が有効であろう(能登谷1999)。グリーンタイドが発生している海岸でサイロを設置し、その中でアオサを乳酸発酵させてデトリタスに変換し、アサリなどの水産物の餌として利用することが提案されている。さらに、現在、生ゴミをメタン発酵させる技術がさかんに研究されている。それらの技術と組み合わせればアオサのメタン発酵も可能であろう。横浜市では毎年4000万円前後を支出し、金沢湾の打ち上げられたアオサを焼却処分しているらしい(能登谷1999)。発酵によるメタンガスを売することで収益は得られないとしても、アオサの処分費用を自治体などからいくらか補助してもらうことでアオサ発酵

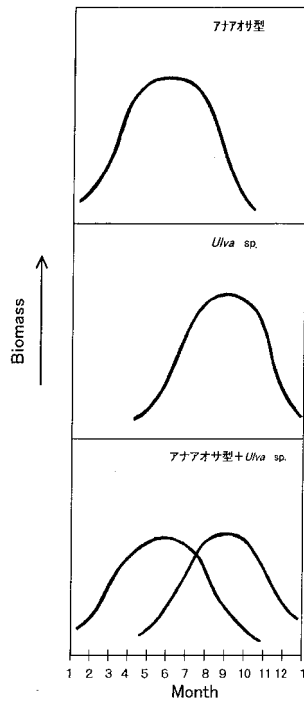


図5. バイオマスの季節変化と主要構成種の関係。アナアオサ型が主要構成種である場合(例:神奈川県金沢湾)、春から夏にバイオマスが最大になる。Ulva sp. が主要構成種である場合(例:高知県浦ノ内湾)、夏から秋にバイオマスが最大になる。両者が混合するとグリーンタイドが春から秋まで長く続く。

事業がなりたつかもかもしれない。近々、地球温暖化防止条約が発効される。政府は炭素税の導入も検討を始めた。以前ならば、バイオマスエネルギーは化石燃料と比べてコスト高であり相手にされなかった。しかし、現状では化石燃料に環境コストが上乗せされようとしている。時代は変わった。海藻によるエネルギー生産をもう一度考えるべきところに来ている。他に例がないほど短期間で爆発的に大繁殖するアオサを循環型エネルギーサイクルの基点として利用すべきだ。

文献

Arasaki, S. 1984. Hydrobiologia 116/117: 229-232.
 Blomster, J. 2000. W. and A. de Nottbeck Foundation Sci. Rep. 20: 1-24.
 Coat, G., Dion, P., Noailles, M.-C., Reviers, B. De, Fontaine, J.-M., Berger-Perrot, Y. and Loiseaux-de Goër, S. 1998. Eur. J. Phycol. 33: 81-86.
 Fletcher, R. T. 1996. The occurrence of 'green tide', p. 7-43. In W. Schramm and P. H. Nienhuis (eds), Marine Benthic Vegetation - Recent Changes and the Effects of Eutrophication. Springer Verlag, Berlin.
 平岡雅規・大野正夫・川口栄男 1998. 藻類 46:

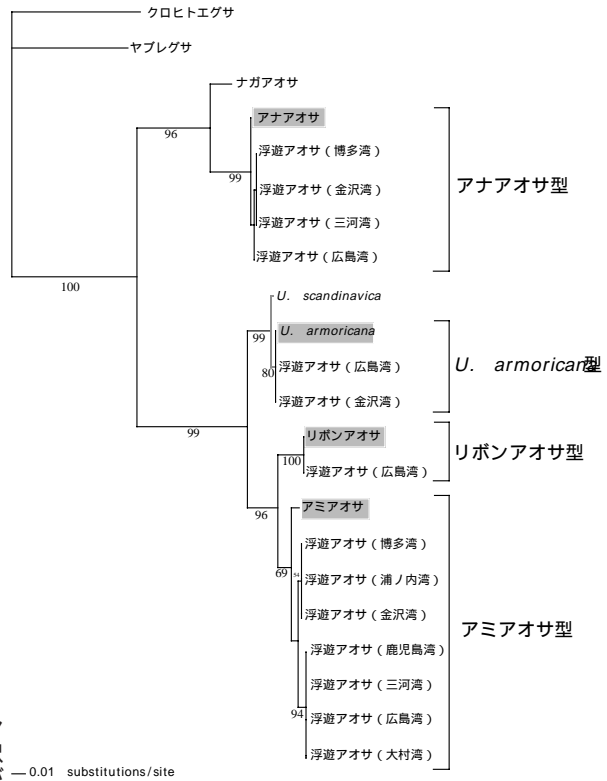


図6. 核にコードされた ITS (Internal Transcribed Spacer) 領域によるアオサ類の最尤系統樹。内枝下の数字は100回のブートストラップでその枝が支持された割合を示す。日本各地から採集された浮遊アオサは大きく4つの分類群、アナアオサ型、U. armoricana型、リボンアオサ型、アミアオサ型に分かれた。

161-165.
 平岡雅規 2000. 愛媛連合大学院学術博士論文.
 Malta, E.-J, Draisma, S. G. A. and Kamermans, P. 1999. Eur. J. Phycol. 34: 443-454.
 右田清治 1985. 長崎大学水産学部研究報告 57 : 33-37.
 能登谷正浩 1999. アオサの利用と環境修復. 成山堂書店, 東京.
 芹澤如比古・井本善次・大野正夫 2000. Bull. Mar. Sci. Fish., Kochi Univ. 20: 29-33.
 岡村金太郎 1921. 日本海藻図譜第4巻. 風間書房, 東京.
 大野正夫 1988. 附着生物研究. 7: 13-17.
 大野正夫 1999. アオサと大繁殖, p. 1-11. 能登谷正浩(編著) アオサの利用と環境修復. 成山堂書店, 東京.
 上ノ園雅子 2000. 博多湾奥部浮遊アオサにみられる2型について. 九州大学農学部修士論文.
 吉崎誠 1998. 日本藻類学会第22回大会プログラム p. 78.

(¹高知県海洋深水研究所, ²北海道大学先端科学技術共同研究センター, ³水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所)