

NPO 法人有明海再生機構 有明海講座

有明海の赤潮

九州大学 名誉教授(現香川大学瀬戸内圏研究センター特任教授) 本城凡夫

2009年2月19日(木) アバンセ

今日は有明海の赤潮という題名で話題を提供させて頂きたいと思います。私はすでに退官していますから、現役の方に協力して頂きました。一人は佐賀県有明水産振興センターの松原賢博士です。センターの所員のみなさまがご苦勞して集められましたデータも含まれております。二人目は九州環境管理協会の中島雅孝博士です。この中島さん以外に協会の方々が協力して下さいました。こういう協力を得てこれからの話を皆様方にご説明する

ことができます。ご協力頂きました皆様方に感謝申し上げます。

有明海に発生する赤潮はもう皆さんご存知ですが、主にシャットネラ属と珪藻の赤潮です。それから皆さんには新しいかもしれませんがアカシオ・サンギネアが赤潮を形成するようになって来ております。

まずは夏季に発生するシャットネラ属の赤潮について話をしたいと思います。シャットネラというプランクトンは熱帯から温帯域に分布しております。日本では静岡県の浜名湖、京都府の舞鶴湾を北限としておりまして、暖かい海域に生息している種類です。例えば、インドネシアに行きました時にもシャットネラ細胞を観察することが出来ました。

シャットネラ属のうちシャットネラ・アンティーカとシャットネラ・マリーナという、2種が日本における有害赤潮の代表種であります。その他にも時々別の種類のシャットネラの赤潮が発生

することがありますけれども、有明海ではまだ観察されていません。ですからアンティーカとマリーナという名前を覚えて下されば大丈夫です。サイズは大きさが50から130マイクロメートル(0.05から0.13ミリ)の大きさです。少し光りを当てながら試験管を覗くと生物の粒を見る事ができます。シャットネラ・アンティーカの方がマリーナよりもかなり大

有明海に発生する次の赤潮について 話題を提供する。

1) シャットネラ属赤潮

2) アカシオ・サンギネア赤潮

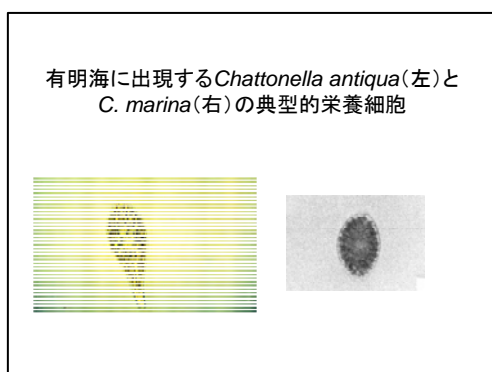
3) 珪藻赤潮

シャットネラ(*Chattonella*)属について

- *Chattonella* 属は世界の熱帯から温帯域に分布している。日本では静岡(浜名湖)と京都府(舞鶴湾)を北限とする。
- *Chattonella* 属のうち *C. antiqua* (HADA)ONOと *C. marina* (SUB-RAHMANYAN) Hara et Chiharaの2種が日本における有害赤潮の代表種である。
- *C. antiqua*: 50-130 μm x 30-50 μm
C. marina: 30-50 μm x 20-30 μm
- *Chattonella* 属の赤潮は我国では1969年に広島湾で最初に記録された。
- モノクローナル抗体への反応は瀬戸内海産と鹿児島湾産 *C. marina* で異なった。しかし、遺伝的相違は確認されていないようである。

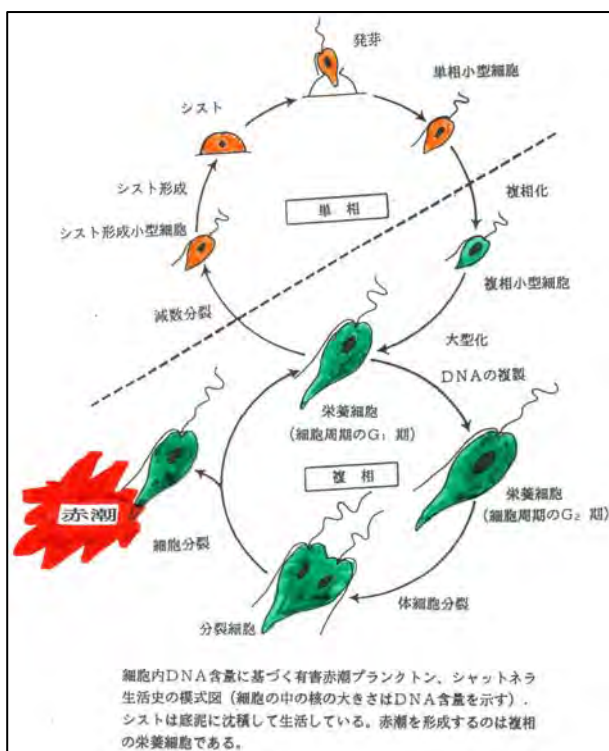
きいサイズで、我が国で最初に赤潮として記録されたのは1969年、広島湾です。それからモノクローナル抗体という技術を使って瀬戸内海のシャットネラ・マリーナと他の海域のマリーナで抗体反応の違いをかなり以前に長崎慶三博士が調べられたのですが、鹿児島湾産のマリーナを除いて、他はすべて瀬戸内海産と同じであるということ、鹿児島湾産のマリーナは種類が同じでも細胞表面の性質が異なることが分かっています。その頃、まだ有明海のシャットネラ属の赤潮は今ほど発生していなくて、有名ではありませんでしたから、有明海産株によるモノクローナル抗体による実験はされていません。有明海産マリーナは鹿児島産に近いのか瀬戸内海産に近いのかはまだ分かりません。それから、シャットネラ・アンティーカーとマリーナ間の遺伝的相違はまだ確認されてないという事です。

一方、瀬戸内海では1969年からシャットネラ属は赤潮を形成してきました。瀬戸内海の研究成果も含めて話をしたいと思います。



左の図で左側がシャットネラ・アンティーカー、右側がシャットネラ・マリーナ、尻尾の細長いのがアンティーカーで、マリーナは丸形状です。

左下図はシャットネラ属の生活環です。赤潮を形成するのは、点線より下の大きい細胞の方です。これは核、核の中のDNA含量が上側の細胞よりも2倍量です。この大きな細胞から小さい細胞へと変わって行くわけですが、この時に半分のDNA



A含量になってしまいます。この小さくなった細胞は更に形態を変化して半球球のシストになります。この形態で冬を越します。春になるとシスト殻の中からポコーンと細胞が出て来て泳ぎ出します。この泳ぎ出した細胞が次第に大きくなって倍のDNA量を持つようになり、サイズも大きくなって赤潮を形成する細胞へと変化することになります。この細胞が何回も何回も分裂すると海水中にたくさんの細胞が増えてくることになり、海水の色が赤褐色に色付くということです。このシャットネラ属の生活環は京都大学（現在、北海道大学）の今井一郎博士、DNA含量の変化は瀬戸内海区水産研究所の山口峰生博士が発見されたものです。

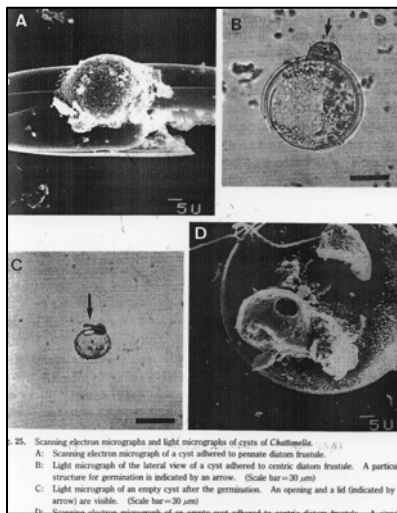
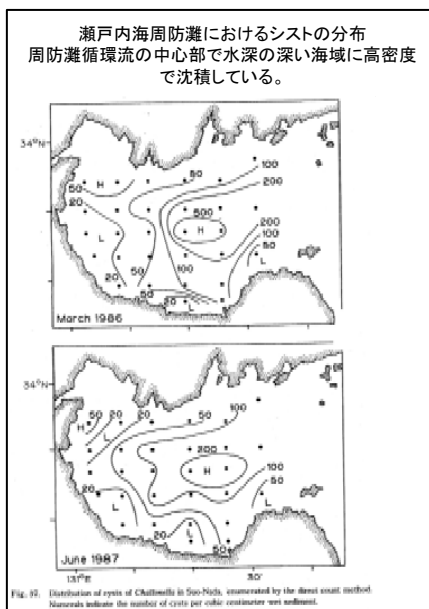
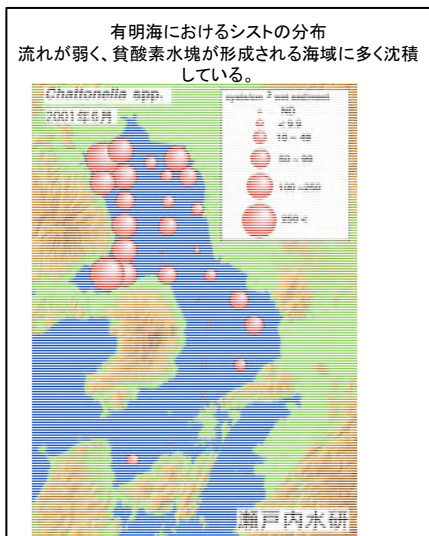


Fig. 25. Scanning electron micrographs and light micrographs of cysts of *Chlamydomonas*.
 A: Scanning electron micrograph of a cyst adhered to pennate diatom frustule.
 B: Light micrograph of the lateral view of a cyst adhered to centric diatom frustule. A particular structure for germination is indicated by an arrow. (Scale bar = 30 μm)
 C: Light micrograph of an empty cyst after germination. (Scale bar = 30 μm)
 D: Light micrograph of a cyst after germination. An opening and a lid (indicated by arrow) are visible. (Scale bar = 30 μm)

左図は今井博士からお借りした写真であります、Aは珪藻の殻の上に半円球のシストが付着している写真です。BとCはガラスビーズを入れておいて、そこに人為的に形成させたシストの写真です。このAの場合にはまだシストに穴が開いていませんが、中の細胞が出てくると、Dのような穴ができます。春から夏にかけて泳いでいるこの大きい細胞と冬に泥の中で眠っている細胞が余りにも違う事にお気づきかと思えます。ですから生活環の完成が遅れたといえるでしょう。



左図は今井博士らの論文から写してきた瀬戸内海周防灘における冬のシストの分布です。周防灘循環流の中心部で水深の深い海域に高密度で沈積しています。豊後水道を入ってきた海水は笠戸湾付近湾の岸にぶつかって東西に分かれます。西の方に分かれた海水は周防灘を回って姫島の間を回って別府湾の方へと流れて行きます。海水が循環している真ん中の深い場所にシストは溜まっています。プランクトンが海水よりも少し比重が重いので徐々に深い所に沈降し溜まっています。



では有明海ではどこにシストは潜んでいるのでしょうか。有明海には大きな円がたくさん分布しています。これは瀬戸内海区水産研究所から提供された図です。一番大きい丸はこういう場所に分布しています。ここは流れが弱く貧酸素水塊が形成されやすい海域で、このような場所にシストは多く沈積します。周防灘と共通しています。ただし両海域では深さが全然違います。周防灘は40メートルに沈んでいる、こちらは10メートル深に沈積していることになります。

室内実験によるシストの形成、発芽条件はどこまで分かっているのでしょうか。試験管の中でシストを作っていく過程において、小さい細胞が出来て来るのは栄養塩を欠乏させた時、すなわち栄養塩が少なくなった

室内実験によるシストの形成・発芽条件

- 室内実験においてシストは栄養塩を欠乏させると形成される。
- シストが形成された後、成熟して発芽能を獲得するには、4か月以上の11°Cかそれ以下の低い温度を経験する必要がある。20°C以上でシストは成熟しない。
- 底水温が15-17°C付近に上昇した頃から発芽を開始する。
- 暗所でも発芽は可能である。

時に大きい細胞から小さい細胞へと切り替わっていきます。この小さい細胞が次にシストになります。栄養塩の欠乏しているような海水でシストは形成されることを意味しています。シストが形成された後、半円球のシストになるわけですが、シストが作られた後、成熟して次の細胞を生み出します。シストは4ヶ月以上、11°Cという冷たい水温に遭遇しないことには発芽能力を獲得できないことが報告されています。20°Cの状態に置いておくと、シストは全く成熟しないでまた翌年まで、底に溜まったままという事になってしまいます。9°C位の冷たいところに置くと1週間位で発芽能力が獲得出来ます。底水温が15~17°C付近に上昇した春に発芽を開始します。暗所でも発芽は可能であることが分かっていますから、深い40メートルのシストでも発芽能力さえ獲得すれば発芽してくることになります。これらは室内実験で得られた知見でありまして、水深は40メートルの泥にいたシストが現場で本当に発芽してきていることをまだ誰も実際には観察はしていません。恐らく、室内実験と同じで暗所でも発芽は可能ですから、発芽してきているに違いありません。

C. antiqua の生理・生態特性

- ビタミンB12を要求し、特に鉄とマンガンが必要とする。
- 有機リンを利用できるが、アルカリ性フォスファターゼ活性が大変弱い。
- 播磨灘における表面水の溶存鉄は、3.9-10 nMとであり、この鉄濃度では最高増殖速度を支えるのに不十分である。しかし、鉄が増殖を規制する重要な要因であろう。
- 水深7-10mまで夜間に下降する。

今度は栄養細胞について話をします。生理的特性は、随分古くから研究が為されています。ビタミンB₁₂が海水の中に溶解していないと本種は正常に育ちません。特に鉄やマンガンも増殖に必要です。これらは岩崎英雄先生の研究成果です。有機リンを利用するためには有機リンを無機リンに分解しなければなりません。その時にアルカリ性フォスファターゼという酵素が必要になる

のですが、この酵素を測定してみると非常に少ないということが分かっています。しかし僅かながら利用できそうです。

次に、播磨灘における表面海水の溶存鉄というのは、3.9から10ナノモルという、すごく薄い濃度で溶けているにすぎません。ですから、この鉄濃度ではとても増殖速度が増して素早く増殖するためには充分ではないこととなります。しかし、鉄が増殖を規制する重要な要因であるという事は、室内実験の方からも裏付けられています。実際に瀬戸内海の播磨灘などでは高い濃度で鉄はありません。それから本種が水深7~10メートルまで夜間に下降するということが兵庫県の家島半島の野外観測で分かっています。それによれば、他のプランクトンに較べて、下方へと動く速度は非常に低いという結果でした。

鉄の増殖促進

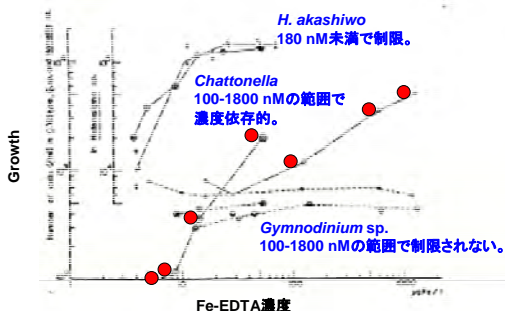
- シャットネラは底泥と海水の懸濁液で増殖する。
- EDTA-鉄で増殖(他の栄養分が十分であっても鉄がなければ本種は増殖しない。鉄濃度の増加に従い増殖は加速する。再実験でも同じ結果が得られた。)
- EDTAを添加しない鉄添加培地(pH 8.2)でも増殖できる。これはコロイド鉄で増殖できることを示唆する。
- 有明海において増殖に関する鉄の研究は全く不足している。有明海で鉄濃度は常時十分なのか、あるいは河川水、貧酸素水、泥底間隙水などの上層への供給事象を必要とするのかあるいは日周鉛直移動(佐賀大学確認)で夜間に十分な栄養物質を摂取できるか？

鉄による増殖促進の話をもう少し詳しく致します。本種が活躍に増殖するには鉄がないといけないことが分かってきましたので研究が盛んに行われました。私も若い頃に鉄の実験をしましたので、その結果をお話いたします。まず、底泥と海水を混ぜて振ります。そしてしばらく放置すると上の方に懸濁液ができます。重い泥は沈積します。その懸濁上澄み液を培養に添加するとシャットネラの増殖は

非常に促進されます。また鉄を溶かすための薬剤、EDTAと鉄を試験管の中に入れて非常に増殖する。他の栄養分がいくら充分であっても鉄がなければこの生物は増殖しません。マンガンでも同じです。このようにシャットネラは鉄或いはマンガンを多量に要求する生物であります。そして鉄濃度の増加に従い、増殖が加速します。再実験でも同じ結果が得られました。

EDTAを添加しない培地、すなわち解けない状態で鉄を培地に添加したことになります。海水の中のpHが8.2の状態に保たれていれば、EDTAと結合していない鉄はどんどん凝集する性質を持っております。ですから凝集が進行すれば鉄の塊は大きくなります。最初は溶けていた鉄が粒状になっていくのですが、それがコロイドというものです。このコロイド鉄でシャットネラは増殖できるという事が分かっています。この機序もかなり推定できるようになりました。有明海で増殖に関する鉄の研究は不足しています。佐賀大学の田端先生が頑張っておられますので、いずれはつきりしてくるかと思えます。有明海において鉄の濃度は常時十分なのか、或いは河川水、貧酸素水、底泥間隙水などの上層海水への何らかの鉄供給事象を必要とするのか、はたまた風を必要とするのでしょうか。或いは佐賀大学では夜には泥の方へ下降する鉛直移動の成果が得られております。そういう事で夜に鉄を摂取しておればそれでもう充分な増殖ができるのかといったような研究がまだまだ必要だと思えます。恐らく浅い所では底泥に接することで彼らは十分

各種植物プランクトンの鉄濃度別増殖 *本城(1983)を改変



な鉄を摂取することが出来るでしょう。ですから、ここに上げた河川水、貧酸素水、間隙水というような事象で鉄が供給されるということは必要ないのかもしれませんが。こういったところがこれからの大きな研究として残っています。

次の図は、横軸に溶けた鉄の濃度で、縦軸は増殖を示しています。鉄の濃度が上がれば

シャットネラ増殖はどんどん進みます。シャットネラだけではなく、ヘテロシグマという赤潮プランクトンも低い鉄濃度で増えます。ジムノジニウム・ミキモトイは全く鉄濃度を高くしても増殖を致しません。ですから、シャットネラやヘテロシグマといったラフィド藻の仲間は、どうしても鉄を必要とするように思います。或いはマンガンも必要とすると思います。

次に、赤潮発生の予察から想定される播磨灘におけるシャットネラ赤潮の発生機構の推理です。瀬戸内海は大きな被害を受けましたので、発生予察の研究が進みました。シャットネラ赤潮の中・長期及び短期予察システムの確立試験が1986年に水産庁の委託予算で為され、10年ほどを要して、中・長期予察と短期予察が可能になりました。確率は大体9割5分ほどです。精度の高い予察手法が完成した途端に播磨灘においてシャットネラは赤潮を形成しなくなりました。皮肉な物ですね。三重県の五ヶ所湾で私はジムノジニウム・ミキモトイ赤潮発生予察技術を完成しました。それから数年してこの湾で本種は発生しなくなりました。彼らはどうも人間の研究を見透かしているのではと思えるほどです。今日は後で有明海におけるシャットネラ赤潮発生予察の話をしたとおもいますが、有明海の赤潮発生予察を完成させたと同時に発生なくなるとこの話は本当でしょうね。2度ある事は3度あるといひます。そんな事にでもなったら本当に良いことなのですが、きっとそうはならないでしょう。

播磨灘におけるシャットネラ赤潮の中・長期および短期予察水産庁予察システム確立試験(1986年)

【中・長期予察】 冬の西風が弱く、冬に黒潮流路が離岸して外海水が流入し、暖冬で、冬から初春に備讃瀬戸からの低塩分水塊が播磨灘に張り出さず、春から初夏の明石海峡の水温と塩分が高く、7月に暖かい高塩分海水が紀伊水道から灘に流入し、7月に灘中央部の水温が高く鉛直密度差が小さい年に発生する。(90%以上の確率で予察可能)

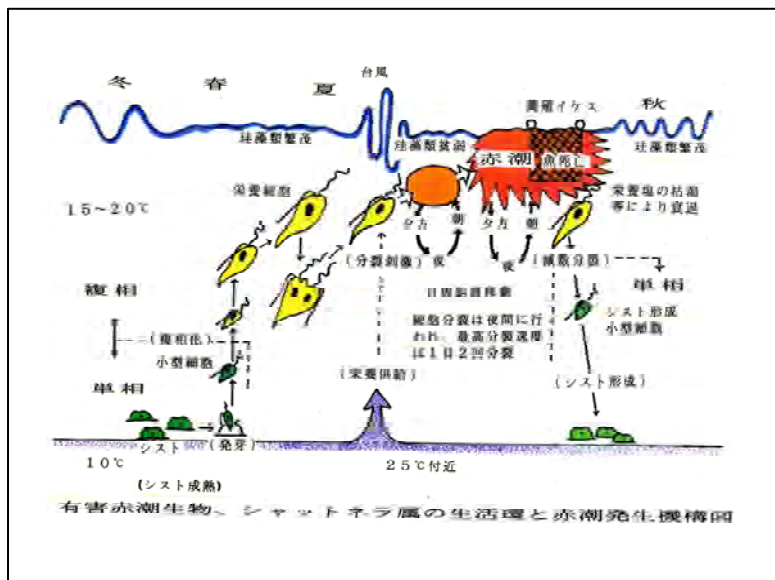
【短期予察】

(25日以内の発生予察)シャットネラ細胞が確認される→表面水温24℃以上→(一週間前予察)→悪天候と気温低下で一時的に水温低下→強風→短期間の混合(栄養塩供給)→(1-2日前予察)好天→表面水温急激に上昇→急激な成層の発達(1-10m水温差2℃以上)→大規模発生

この中・長期予察をまとめて、どういう時に赤潮が発生しているかという文章をスライドに書いています。冬の播磨灘で西風が弱い。冬の西風が弱いという事は博多の方から大阪へと吹き抜ける風が弱いことを示しています。また、四国の沖を流れている黒潮の流軸が陸から遠いところにある。こういう時に紀伊水道から瀬戸内海に黒潮海水が入り易いのです。しかも暖冬です。風が弱くて暖冬、冬から春にかけて備讃瀬戸から塩分の低い水塊

が来ない。これは冬の西風が弱いという事に関連しています。それから明石海峡の水温と塩分が高い、これは外洋水が入ってくるということです。7月に暖かい高塩分の海水が紀伊水道から再び流入し、7月に灘中央部の水温が高くて混ざり易い環境になっている年に発生し易い。これらの条件が発生年の特徴です。これを有明海に当てはめようと私は努力したのですが、中々そのデータがありません。それからこれは25日以内で予察しようという短気予察ですが、まず、25日前にシャットネラの細胞が確認される。そして表面水温が24℃以上になっている事も大切です。今度は1週間前です。悪天候と気温の低下で一時的に水温が低下する、強風が吹く、短期間の混合、これは栄養塩の供給を意味しています。1日から2日前に好天になり、表面の水温が急激に上昇して成層が発達して大規模な赤潮になる。これが短期予察です。播磨灘におけるこの短期間の混合ですが水温が低下し、強風が吹くというのが有明海には当てはまらないのです。これまでに有明海では4回も5回も赤潮が形成されています。そこで私は強風が吹いてい

るかどうか調べてみましたが、どうもなさそうです。となれば、播磨灘の研究成果が有明海にはどうも当てはまらないのではないかという事になってしまいます。



左図は瀬戸内海における赤潮発生機構の想定図です。泥の中に半円球のシストがあります。水温が上昇してくると穴から出て来て小さい細胞が海水に分布します。この細胞が大きくなってDNAが倍加し、この細胞が水の中に浮いている。このプランクトンは何回か分裂しながらこの海域で細胞を高めます。でも台風というか、強風、そして栄養供給、

これがきっかけでシャットネラは増殖を促進される。そして赤潮になる。栄養塩が少なくなると沈んでいく。これが瀬戸内海でずっと説明されてきて、私はこの発生機構に凝り固まってしまいました。有明海も同じ発生機構だろうと。播磨灘のように深い海域と、有明海のような海水の動きのすごく激しい浅い海域とでは随分違うように思います。また、成果が多すぎると頭が混乱してしまうこともあります。

三重県五ヶ所湾でのシャットネラ

- 五ヶ所湾でシャットネラ(*Chattonella marina*)の赤潮形成は稀である。
- 冬も暖かい五ヶ所湾においてシャットネラ栄養細胞は年によって12月まで低密度ながら生息している。
- 室内実験では栄養塩欠乏でシストは形成されるが、五ヶ所湾ではいつ形成されるのか？
- 降雨により塩分が低下した後に増殖が始まっている。
- その際に、野生のシャットネラは増殖能が高くなっている。

三重県五ヶ所湾でのシャットネラの動向は興味があります。五ヶ所湾においてシャットネラの赤潮の形成は非常に稀です。稀ですけれど細胞は生息しているのです。でも赤潮になるほどは増殖はしません。冬の水温が高い五ヶ所湾においてシャットネラの栄養細胞が12月まで低い密度ながら生息している事が分かりました。シストは調べられている。瀬戸内海や有明海と異なっていて40リットルに数個が12月まで観察されます。栄養濃度の低い海域であるのに

栄養細胞が生きているのです。水温の高い鹿児島湾も同じようであればおもしろいのではないかと思います。室内実験では栄養塩欠乏でシストが形成されるのに、五ヶ所湾では形成されないことを示しています。それではいつシストは形成されるのでしょうか。それから、雨が降って、塩分が20付近まで低下した後に低い密度ですが増殖しております。この増殖は雨による栄養塩類の供給と関係していると思います。先程の播磨灘の発生機構想定関係と随分違います。

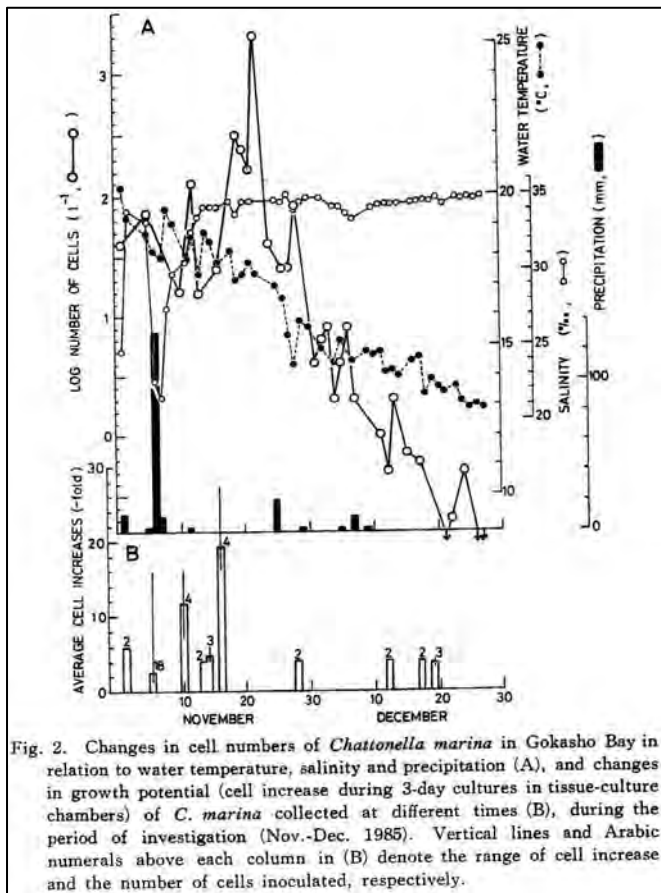


Fig. 2. Changes in cell numbers of *Chattonella marina* in Gokasho Bay in relation to water temperature, salinity and precipitation (A), and changes in growth potential (cell increase during 3-day cultures in tissue-culture chambers) of *C. marina* collected at different times (B), during the period of investigation (Nov.-Dec. 1985). Vertical lines and Arabic numerals above each column in (B) denote the range of cell increase and the number of cells inoculated, respectively.

それがこの図です。縦軸が細胞数、横軸が日です。ここは11月、12月です。ここが12月の30日、ここは20日です。そして水温の軸、塩分の軸が、色々取ってあります。黒い実線はシャットネラ・マリーナの細胞数の変化です。雨が降って、ここから急に細胞数が上がってきています。すなわち、増殖しています。この増殖する時に細胞が次々と分裂していると判断してください。ですから図にも示していますようにこの期間は増殖速度の高い細胞がたくさんいます。このあたりから下がってきています。そして遂に12月20日から細胞は観察されなくなっていました。これは私の努力の成果なのです。ここが1リッターの目盛りです。1ミリリッターの中に1個というのはこの線なのです。ですから1ミリリッターの中に1個と言う細胞は五ヶ所湾において1年に1回し

か見つからないことになります。常時、低い密度で細胞は生息している事がわかりました。これは恐らく鹿児島湾と同じではないでしょうか。

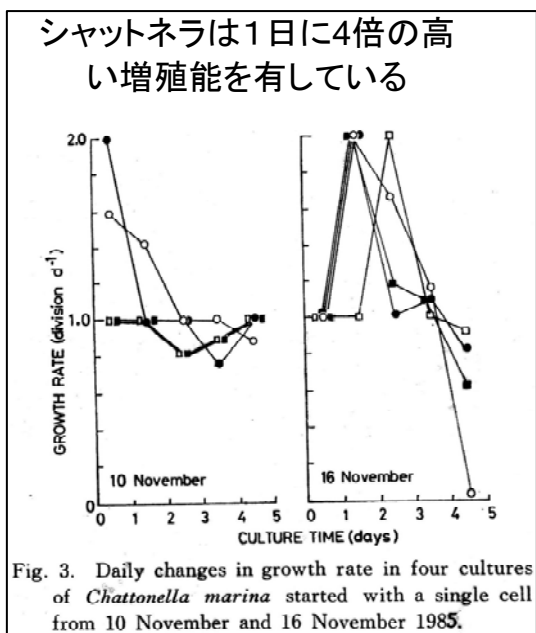
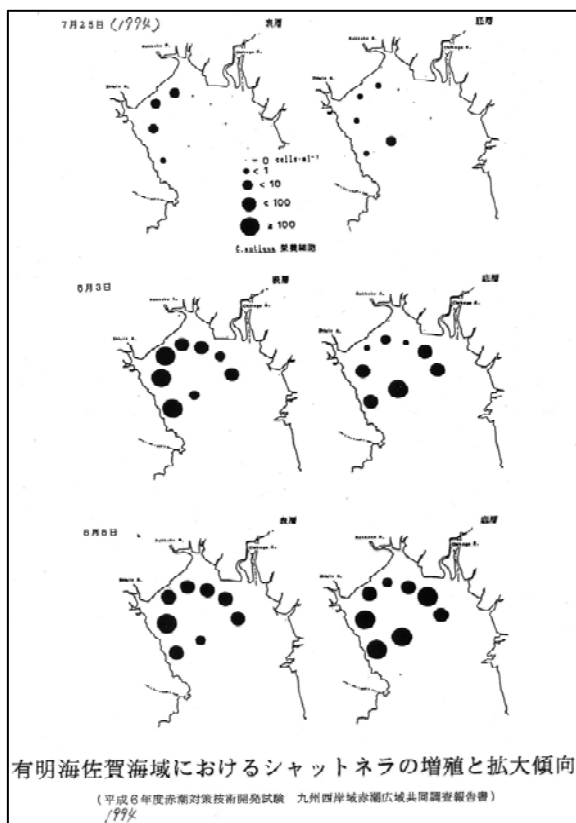


Fig. 3. Daily changes in growth rate in four cultures of *Chattonella marina* started with a single cell from 10 November and 16 November 1985.

シャットネラは1日に夜間に2回分裂する潜在能力を持っています。1日に4倍になれる。このような高い分裂能力をもっていますから、海水の交換の少ない海域ですと、高い増殖速度が観察されるはずなのです。しかし、普通、海水は交換していますから、細胞が増えても海域の外へ捨てられます。これは九州環境管理協会の中島博士達の成果ですが、2007年、有明海諫早湾における赤潮増殖期のシャットネラ・アンティーカは18時間に1回、ほぼ1日に1回の分裂速度で、シャットネラ・マリーナは18.3時間、これも大体1日に1回位の分裂スピードで増えている。諫早湾の場合には1日で2倍になる速度で増えているという結果が得られています。

有明海における赤潮発生の実態を佐賀県有明水産振興センターのデータで説明させていただきます。1984年にシャットネラの1種という表現で最高細胞密度が1ミリリットルに430細胞位記録されています。そして密度に違いはありますが、88年、89年、90年、92年、94年、96年、98年、99年、2000年、2003年、2004年、2007年、2008年という年に発生しています。一方、発生していない年もあります。このようなデータを



赤潮発生予察に使えると良いのですが、水産試験は冬のノリの研究もしなくてはいけない、夏の赤潮の研究もしなくてはいけないということで忙しくされている。しかし、そのような多忙の中で歴代の方達はこうした研究成果を上げられています。

有明海の佐賀海域におけるシャットネラの増殖と拡大の様子を見てみると、1994年ですが、次第に広がっています。かなり濃くなってから福岡のほうへと拡大しています。即ち佐賀海域の赤潮はこういう場所から始まってこういうふうに福岡側に出ていくという結果なのです。風による潮の動きがどうも生物を運んでいるのかもしれませんが。潮汐残渣流で運ばれているのではなさそうです。もっと研究して下さる人達が増えれば良いと思います。

配布した資料にはこのスライドはありませんが

2007、2008年の最新データでも同じです。

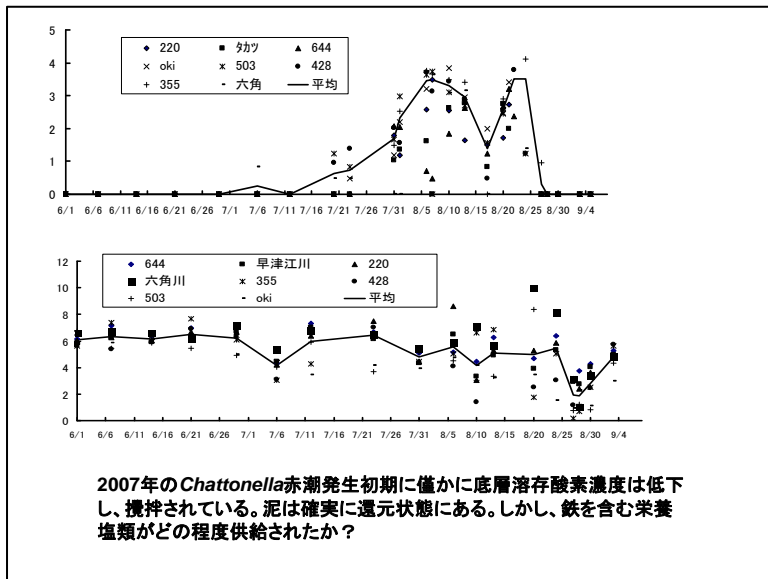
有明海では何年頃からどこで発生し、どのように拡大するか

- 佐賀県における初認海域は西部海域である。西南域での初認が多い。
- 佐賀県西北部海域では1980年代から、長崎県諫早湾では1998年頃から貧酸素水塊が形成されるような滞留海域赤潮は発生するようになった。
- 佐賀県西北部海域と長崎県諫早湾で主として赤潮は発生し、福岡海域に拡大する傾向にある。

最初にどの海域から発生してくるか、その海域の環境を密に調べ、発生初期の特徴を研究していく必要があります。

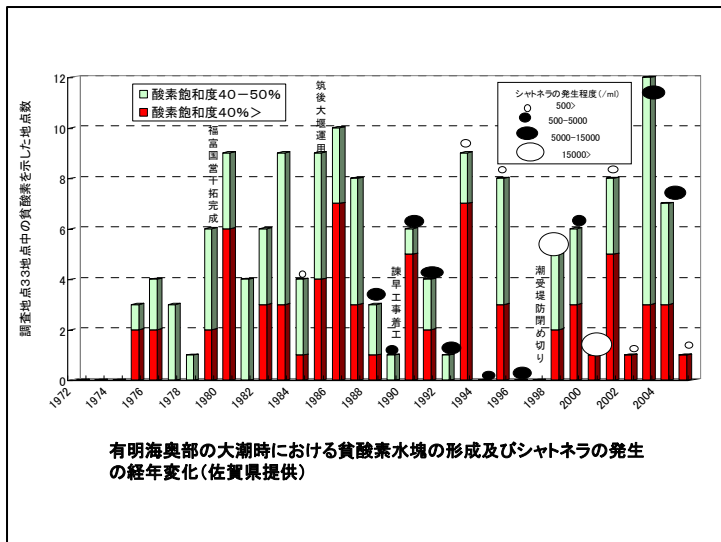
有明海ではどこで発生しどの様に赤潮が拡大しているかということをもう一度話しますと、有明海における初認海域は湾奥の西部海域です。この海域は貧酸素水塊が形成される滞留海域ということで共通しています。そして、この海域で発生して福岡海域に拡大する傾向があるという事です。

佐賀県の西北部と諫早湾で赤潮が形成されるようになったのは、堤防が出来て流れが弱まった頃のような事です。海水が停滞するという事は赤潮を起こすには非常に大事な出来事、必須条件です。何月ごろから発生するのでしょうか。



2007年は年6月、7月の初旬に低い密度で出現した。それから7月の下旬辺りに盛んに分裂を繰り返して、8月の初旬に赤潮になった。この年はその後もう一回赤潮になっています。7月の中旬から下旬にかけて非常に勢いのある増殖が観察されています。2008年はマリノフォーラム21からの提供資料ですが、こういうふう増殖しています

が、この増殖している時は7月21日からの中、下旬に相当します。そういう傾向があります。この中、下旬のところに私達はシャットネラの増殖を一気に加速させる環境条件が整い、この時に集中した研究をしなければならないでしょう。初期発生海域が西部海域や諫早湾であることが分かっています。シャットネラが一気に増殖してくる時の7月中、下旬に何が起きているか。増殖している年と、増殖しない年に何が異なるのかを、きっちりと見極めないといけなと思います。ここに発生、非発生の鍵が潜んでいると思います。



有明海において7月中旬から下旬の環境がシャットネラの発生と非発生を規制しているというふうに思います。この期間の環境を調査し、発生機構や発生予察に関する指標を抽出することが非常に重要でしょう。ここで何らかの対策を打てば、シャットネラ赤潮の抑制につながることもなるからです。

次に、諫早湾における赤潮発生予察手法開発の話をしたと思います。農村振興局のデータがここでは使われます。クロロフィルや水温、塩分の連続データが諫早湾でとられています。この連続データは、発生予察手法を開発していく上で欠かせないものなのです。でもデータが豊富すぎて、私のように年を取ったパソコン処理が得意でない者には解析が難しくなります。九州環境管理協会の皆さんが実行されました。現在、『諫早湾及び有明海におけるシャットネラ赤潮発生予察の試み』と言う題目で論文がほぼ完成したところです。その内容を紹介させて頂きたいと思います。

有明海におけるシャットネラ赤潮発生 の前提条件

- 増殖海域における細胞の増殖速度が増殖海域外への細胞の損失速度を上回る時に赤潮は発生する。それ故、有明海奥部と諫早湾における潮流速の弱まりは赤潮形成を助長する。
- 潮流速の弱い海域の海底には有機物が堆積し易く、夏季には有機物の分解が高くなって、底泥の還元化が進行すると共に、底層に貧酸素水塊が形成される。
- 底泥からシャットネラの増殖を促すリンなどの無機栄養塩類や鉄などの金属類が溶出する。10 m以浅の海域であれば日周鉛直移動で夜間にシャットネラは利用可能である。
- 対数増殖期における河川水の流入は河口循環流が生じるために不利か？

諫早湾の表層のプランクトン相のここ7、8年の特徴を見た結果です。諫早湾において2002年、2004年、2005年、2007年に、シャットネラ、ヘテロシグマなどのラフィド藻類が出現しました。2004年と2007年にシャットネラは 10^3 細胞/ミリリッターという、非常に濃密な赤潮を形成しました。2008年も実は非常に高密度になったと思います。それから2003年、2006年は珪藻類が繁茂したのです。このように年によって大きく違うところがあります。

大きく整理してみると2004年と2007年、2008年はシャットネラ、2003年と2006年は珪藻類が8月に増殖しているのです。これを生じさせた事象は何か。その違いが分かれば、シャットネラが発生しやすい年と、珪藻類が発生した年とに差別がつけられる。2002年から2008年までの連続観測によるクロロフィルと細胞優占種の間接的関係を、明確に示すことが出来るのです。

- 7月初旬と中旬に珪藻類が優占することが多い
- 8月の優占種は年によって異なる。
2002年は*Ceratium furuca*などの渦鞭毛藻類と珪藻類
2003年と2006年は珪藻類
2004年は渦鞭毛藻類と*Chattonella*属
2005年は渦鞭毛藻類と*Heterosigma akashiwo*
2007年と2008年は*Chattonella*属
- 殊に、7月26日から31日の間に珪藻類が発生した年は8月に*Chattonella*属や渦鞭毛藻類は発生していない。珪藻類が発生しなかった年はこれらの種類が8月に発生する傾向を強く示している。

皆さんからはとても見にくいけれども、この中身のこの四角の所で結んだ7月の中、下旬の所で何があったかを要約しておりますので見て下さい。四角い括弧で囲った前の初旬と中旬は珪藻類が優占することが多いのです。

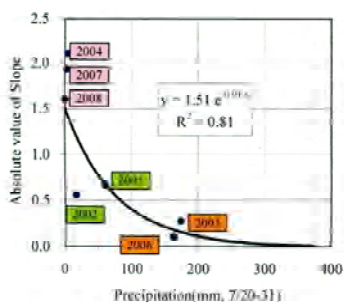
- 7月26日から31日における塩分の鉛直分布から判断すると、

2003年と2006年では表層から底層にかけて塩分が20未満と低く、珪藻類が発生して、ラフィド藻類や渦鞭毛藻類は8月に発生しなかった。この期間の陸域からの淡水の影響によりその後のラフィド藻類や渦鞭毛藻類の出現が規制されている可能性がある。

8月の優占種は年によって異なります。2003年と2006年は珪藻類が優占しました。2004年と2007年、2008年はシャットネラが優占しています。これを記憶しておいてください。諫早湾の7月26日から31日までの塩分の鉛直分布を示します。珪藻類が発生した年は塩分が低いということです。この年とこの年は珪藻類の優占年です。それからシャットネラが発生している年は塩分がこの期間、高く経過しています。それで2003年と2006年では表層から底層にかけて塩分が低く、これらの年では珪藻が発生する。ラフィド藻などは陸域からの淡水の影響の少ない年に発生していると大別できます。シャットネラの発生年は2004年と2007年、2008年、渦鞭毛藻類の発生年は2002年、2004年、2005年、珪藻類の発生年は2003年、2006年、こういうふうで大別できます。

有明海における夏季赤潮の発生予察

7月中・下旬の降水量が少ない年：
シャットネラ赤潮の発生年

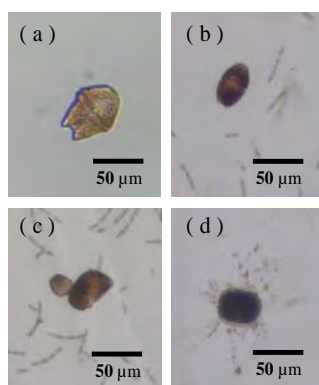


このような解析結果を踏まえて26日から31日までの水温と塩分の関係を見てみました。

2008年と2007年はシャットネラの発生年です。2006年は珪藻類です。2005年は鞭毛藻類、2004年はシャットネラです。珪藻類は2003年に発生しています。2002年は鞭毛藻類です。年毎に異なるのはこの線の傾きです。僅か10日間なのですが、傾きが大きく異なります。シャットネラの発生年にはこの線が立っています。すなわち、傾きが高い。それは何かといいますと、塩分が下がっていないという事を示しています。ですからこの係数の傾きを指標にして赤潮の発生予察を試みようということです。傾きが2.5という大きい時はシャットネラの赤潮です。それから傾きが高い時は珪藻類です。中間が渦鞭毛藻類です。シャットネラとこれらとは傾きで分けることができます。次は7月20日から31日までの降水量で整理したものです。雨の降っていない年に時に傾きが高いという事で、降水量を予測に使用すればシャットネラの赤潮が発生するかどうかを区別できるのではないかとこの事です。川からの流入量と降雨量との関係を見てみると、明瞭な関係が認められて、ここに示しているのは縦軸が川から入って来る水の量、横軸が降った雨の量、この図から発生年はどういう所にあるかと言うと、この所に集中している。集中しているところの流入量は4.0で、これよりも高ければ発生していない。ということは赤潮発生の日から10日前に、1日に80ミリの雨が降るか降らないかの確率で決まってくることを示しています。気象での予測を今後更に精度を高める研究が必要でしょう。現時点では、ここ5、6年間での研究成果ですけれども、降水量でうまく予測できるのではないかとこの事が分かってきつつあります。赤潮の発生予察には「当たるも八卦当たらぬも八卦」の所もありますけれども、7年間のデータから解析していますから精度はかなり高いはずで

時間が残り少なくなって来ましたけれどもアカシオ・サンギネアという渦鞭毛藻類が、最近有明海でシャットネラ赤潮の発生と同じ年代から観察され始めています。この生物はシャットネラと共通して出現しているわけですが、何故有明海で発生し始めたのかと考えたのですが、文献から、ああそうかというヒントが出て参りました。それはこの生物は非常に鉄が好きという論文がありました。

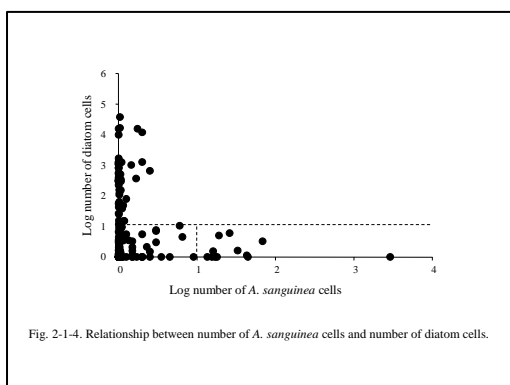
珪藻類を接種して培養すると本種は形態異常を呈して増殖できなくなる。



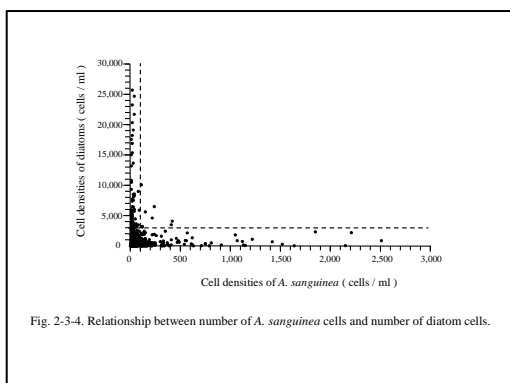
既に、シャットネラは鉄が好き、マンガンが好きという話をしました。短絡的であることは承知していますが、ここにシャットネラとの共通項があるように思えるのです。1980年代から出現し始めたのは、その時期から鉄を溶出させるような環境が有明海に整ってきたのかということになります。泥の中の還元状態が進んで、貧酸素水塊が出来るようになって、泥の中の鉄が水へと出やすい環境になってきたのではないかとこの事です。この生物の研究は少ないの

ですが、現在、佐賀県の職員である、松原賢博士が九州大学の私の研究室でまとめられた博士論文の一部を次に紹介したいと思います。

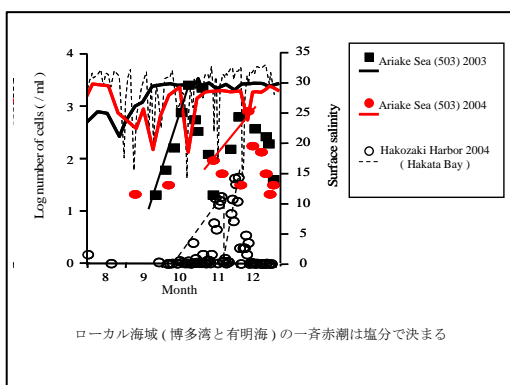
この生物はこういう形態をしています。非常に大きく50ミクロン位、これをが室内で培養すると元気に泳いでいるのですが、培地の中に珪藻類を接種すると全く形を変えてしまうのです。そして全く増殖できなくなります。珪藻類を大嫌いな生物なのです。箱崎港にもこのサンギネアは発生します。箱崎港で何故この生物は冬に出現するのかということに松原博士は疑問を持ちました。室内で温度を変えて培養すると25℃が1番好きなのです。ではどうして秋の終わりから冬に箱崎港では出現するのでしょうか。この図は資料に載せていませんが、サンギネアの密度が高くなるのはこの11月です。この年もそうです。この年でもそうです。この白い点で示す珪藻類が少なくなるこの時期を狙って出現してきているように見えます。



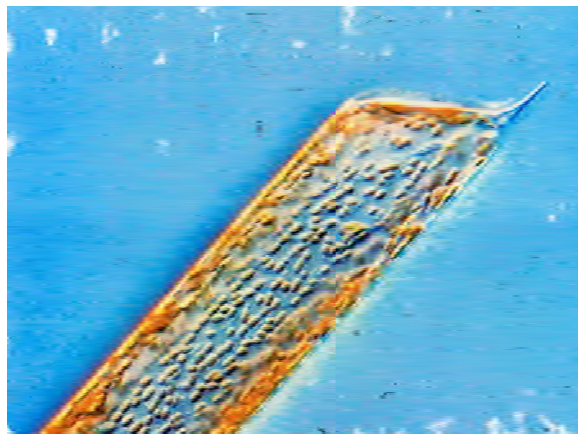
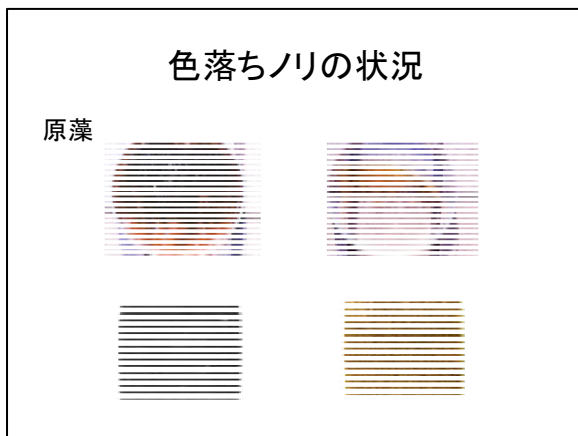
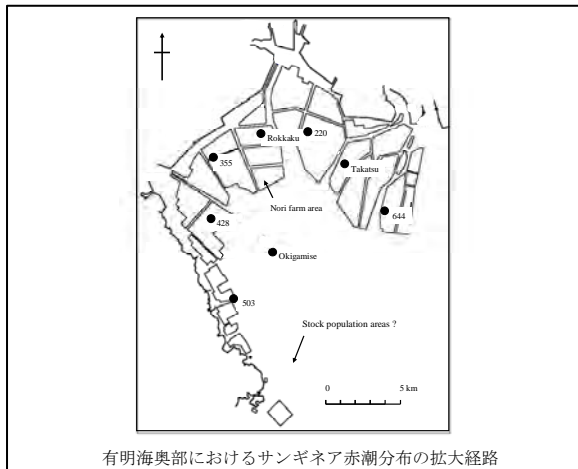
左図のように、箱崎港もアカシオ・サンギネアと珪藻類の軸をとってプロットしてみますとアカシオ・サンギネアが出ている時に珪藻類がないという事が分かると思います。有明海においても珪藻類が少ない時期に出現して増殖します。有明海にはこの時期に鉄は泥から出て来ている筈なのですが、それでもなお表面に珪藻が出現していたら彼らは出現できない。非常に増殖競争に弱い生物といえます。



有明海において出現した時期は皆冬なのです。11月と12月、ここもそうです。これを箱崎港と同じ様に整理してみます。こちらの軸がサンギネアの細胞密度です。こちらの軸が珪藻類です。サンギネアが出現している時に珪藻類は出ていません。もう本当に可哀な位珪藻類の出現に敏感なのです。アカシオ・サンギネアは25℃、高塩分条件下で増殖することが室内実験で分かっています。これは、松原博士の新しい発見です。高塩分条件下で増殖することが室内実験で確認されています。珪藻類の発生の少ない、降水量が少なく、塩分低下の少ない冬季に多く発生するのは何故かという、珪藻類が出現しなくなることに加えて、塩分が安定して続くことが大きく関わっています。



この図はちょっと見難くてすみませんが、塩分が変化していない時に増殖しています。有明海と箱崎港の2つの海域で共通してそうです。雨が降っていない、塩分が低下していない時に増殖するというこ



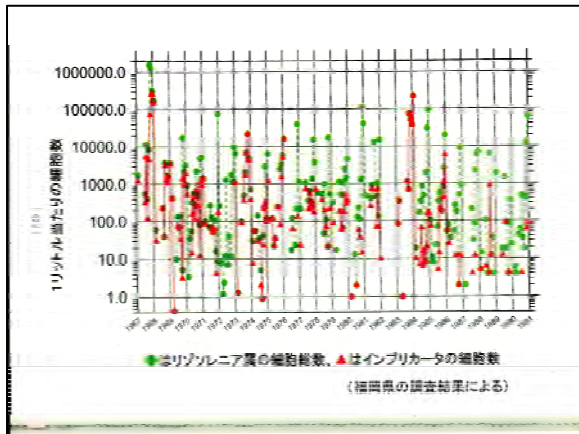
リカータの表面にある模様を走査電子顕微鏡で見ないと種名まで同定できないのです。このペン先の形態に加えて殻の模様が同定の決め手になるという事で、20年程前の技術では種の同定は無理だったという事です。ところが福岡県水産試験場の倉庫屋根裏に過去30年、1967年からの標本ビンが残っていました。屋根裏にあがった日本資源保護協会の皆様の話では、すでにホルマリンが乾いてしまっていたビンもあったとのことですが、それに液を加えて攪拌し、細胞を懸濁させて、電子顕微鏡を使って、リゾソレニア・インブリカータはいたのかどうかを、瀬戸内海区水産研究所の板倉茂博士が調べられました。

です。しかも珪藻類がないという条件が加わっています。

増殖初期の水域は塩分が高くはければなりません。さらに、珪藻類の出現の比較的少ない場所でしょう。そのような場所のデータを整理して探してみると、諫早湾の外側、大浦の沖合がどうも初期出現の候補場所となる。その後奥部へと時計周りに回って赤潮は広がる傾向にあります。「九州海域の赤潮」のデータと冬のノリ場に観察された佐賀水域のデータを使用して、グラフを描きました。夏は本当に出現しないのか。この辺りを今後調べていく必要があります。サンギネアが冬場に出るとノリの色落ちに関係してきますから、研究する必要があります。

今度はリゾソレニア・インブリカータについての話です。2000年に発生して大被害を与えた生物です。その時のノリの色落ちはひどいものでした。普段はこのように黒いノリが黄色ノリに変わってしまうのですから大変です。

その生物はこういう形をしています。ペン先のような形態で、色素が体の大きさの割には少なく、赤潮の時に着色するというよりも、石綿を巻いたようなキラキラした赤潮を呈する生物です。リゾソレニアという大きい形をしたあのペン型の特徴ある生物は過去に何回も発生してきました。しかしインブリカータという種名で発表されたことは1回もありません。それは非常に種類の同定が難しいからです。インブ



この図が結果です。67年から91年までの資料です。そしてここが1リッター当たりで10万個ですから、1ミリリッターに100個に相当します。細胞が大きいですからこの密度を越えてれば、恐らく赤潮になったと考えて良いと思います。そうしますと、1984年、1967年、この2つの年はまさしくインブリカータの赤潮が発生していたこととなります。ところがこの期間中に64年と67年、それともう1年は、ノリの色落ちに関係したリゾソレニアの発生年です。です

から、これらの年はインブリカータではないこととなります。そして、インブリカータが発生した年は被害が発生していませんので、非常に局所で短期間に発生していた可能性があります。奇遇なのですが、この間は16年です。ここから16年足すと2000年です。周期は偶然でしょうがこのように上記の観察はインブリカータ赤潮がかなり前から発生しているという証拠になります。

この生物は水温が25℃、高塩分で低栄養塩濃度の環境下が好きです。福岡県水産試験場や、瀬戸内海区水産研究所の結果が示しています。栄養塩が非常に少ない時に発生しているという現場結果も福岡県が報告しています。有明海でインブリカータ赤潮の夏場の発生が少ないのは何故かと推測しますと塩分が非常に低いことが関係しているように思われます。

これは熊本県の有明海の湾口から中央部付近にかけてのデータを広島大学の山本民次博士が整理されたものです。これにより毎年5月から9月までこの海域では塩分がかなり低くなっています。緑川の影響とか、菊池川の影響もあるでしょうが、毎年のように低いという事は、これより奥部の海域の塩分はもっと低いはずで、このような低塩分状態を彼らは嫌っているのではないのでしょうか。夏場も外海から細胞が供給されているはずですが、低塩分のために奥部では増殖できない可能性があります。

小型珪藻類増殖の特徴

- 1) 珪藻が急な塩分低下に弱く、回復に敏感である。
- 2) 河川水が流入した後晴天が続けば、河川水(真水)の直下で好みの塩分層においてすでに珪藻の増殖が始まっており、河川水が海水と混合するとそれが予備軍となって一気に赤潮形成につながる。
小型珪藻の増殖には全点日射量13MJ/m²以上の晴天の連続が必要である。

結論: 降雨があり、その後高い全日日射量を与える晴天がまず必要で、適切な塩分を呈する海水で河川水中からの栄養塩類を利用して一気に増殖する。漁師さん達の古い伝え「雨が降って晴天が続くと赤潮が発生する」は小型珪藻の赤潮発生を言い当てている。

小型珪藻類を、最後に簡単に話をさせていただきます。今年もノリの色落ちが冬に発生したそうです。冬季における小型珪藻の情報は多くありますが、夏の情報はあります。小型珪藻類が増殖するときの環境特徴を西海区水産研究所の長副聡博士が研究されています。珪藻類の赤潮は短期間で収束する傾向にあります。珪藻は急な塩分低下に弱いようです。それから塩分の回復に非常に敏感でもあるようです。塩分が急に下がる時には大半が死ぬけれども、生き

残っている細胞が塩分の回復する時に一気に増殖する。河川水が流入した後に晴天が続けば河川水の真水の直下表面から10センチから15センチ付近、生育に好みの塩分層があります。淡水は最表面上を滑って流れていますから、生育に好みの塩分層では、既に珪藻類は増殖をし始め

ています。上の真水が下の海水と次第に混ざって、ほぼ混ざってしまったら、10センチから15センチ付近で増えていた細胞が、一気に加わり増殖して赤潮になることができます。珪藻赤潮が一気形成されるためには、まず晴天が連続して続かなくてははいけない。これが一番大きい要因であります。珪藻が赤潮を形成するためには、全天日射量が13メガジュール/平方メートル以上の晴天が連続して3、4日以上必要です。結論として、降雨があり、その後高い全天日射量を与える連続の晴天が必要で、すでに適切な塩分を呈する淡水層の直下で増殖していた細胞が加わって河川水中からの栄養塩類を利用して一気に増殖します。これは漁師さん達の古い言い伝えで「雨が降って晴天が続くと赤潮が発生する」というそれそのものであります。今年のデータも幾つか集まり始めていますが、まだ整理は十分ではないようです。どうぞ晴天後の全天日射量、13メガジュール/平方メートル以上の日がどの位続いたかという事を、是非忘れないで下さい。冬場の赤潮が夏期の赤潮と同じ機序で説明できるのかは不明です。小型珪藻の赤潮はお天とう様が作ったものであります。この小型珪藻が有明海の魚や貝達の餌であります。これはノリと栄養競合致しますけれども、小型珪藻類が発生しないことには魚介類が育ちません。有明海では不可欠な生物です。そこは仲良くしていく必要があるということです。シャットネラと違った我々に恵みを与える生物として捉えて頂ければと思います。以上でございます。

【質疑応答】

質問者：

諫早湾の赤潮の予察ということで晴天が何日以上続いたらという話でしたが、シャットネラの方で、去年の夏は7月5日か6日位に梅雨明けしてずっと晴れていたからシャットネラの赤潮が出たというのですが、ここで分からないのは、仮に7月20日位まで雨が降りつづいて、つまり梅雨明けが遅かったという事が起こったとしたら、その後、珪藻の赤潮が起って、その後に全てシャットネラの赤潮が起くるのではないかと思うのです。だから梅雨明けが遅かったら、シャットネラの赤潮も遅く発生するのではないかと思うのです。もしそうならないのであればその理由は何なのか。

九州大学 名誉教授 本城凡夫：

私たちの発生予察はあくまでも諫早湾のデータに基づいて開発されています。佐賀県地先の有明海でも同じであると思っております。ここでは26日から10日前の雨を指標にしました。雨が80ミリ以上降ったらそれは赤潮になりきれない。その時には小型珪藻が出てくるし、その小型珪藻が増えればシャットネラの赤潮はないと捉えています。その前の解析をもっとやって下さい。今回の話は26日から10日前の雨に焦点を当てています。ですから、今質問されているようなことを深く追求してみないといけないと思います。的確にあなたの質問に答えるところまでには至っていません。是非あなたの疑問を私たちの論文が出たら解析してみてください。

質問者：

近年有明海で無機の栄養塩が減少傾向にある。これは無機窒素が減っているのですが、実際私が諫早湾に入って水を取ります、諫早湾内の海水というのは無機の栄養塩が非常に低いです。有機の有機態窒素という形でケルダール態窒素の測定方法と有機態窒素という測定方法、両方でやっても大体近い値が出ます。有機態窒素の含量が高いのです。70マイクロくらいの値というのがざらに出てきます。一方無機態では1マイクロを切る様な水が取れているのです。諫早湾内では大体そうです。そして北里大学に緒方武比古さんという方がおられて、ディノフィシスフォルティというのは葉緑素、食包を持っていて、バクテリアを食べるとい様なことも書いている。それからアレキサンドリウム・タマレンセこれは渦鞭毛藻類なのですが両方も、有機態窒素は何でも利用できるという研究発表をしていて、貝毒の研究をやるためには有機態窒素を調べることが予測、予報に繋がってくるのではないかという事を書いているのです。

こういうことを考えてみますと、シャットネラ・アンティーカというのは、本城先生のお話では無機態窒素を利用するという話で来ていると思いますけれども、シャットネラ・アンティーカも有機態の窒素を食べる可能性があるのではと考えます。今後の研究の方向として無機態窒素だけではいけない、有機態窒素も追わなくては行けないと。近年渦鞭毛藻類は夏場に非常に増えています。ですから先程のシャットネラ・アンティーカ、これは430位であったのが1万を超えるような事になっています。この違いというのはやはり有機態窒素の有明海内の量が変化してきていると思うのです。

九州大学 名誉教授 本城凡夫：

実はそれは既に山口峰生博士が調べておられまして、シャットネラ・アンティーカとマリーナは有機態窒素は利用せずに有機態リンを利用するという結果を論文として報告されています。その結果は室内実験で得られています。有機窒素に注目された質問ですが、有機リンに注目して必要があるということです。

質問者：

有明海の方では基本的に半時計の流れがあるということですが、シャットネラの広がり方というのは潮流と反対みたいな拡大なのですが、これは西部の方でシャットネラが発生しやすい状況がまず現れて、それが広がっていつているのかどうか、どういう解釈をしたらよいのでしょうか。

九州大学 名誉教授 本城凡夫：

反時計回りの流れがあると聞いています。でも現実には西から東へと分布は拡大しています。それがどうしてなのかわかりません。とにかく西から東、あるいは南西側から北へと上がっていくという分布拡大の動きが有明海にはある。流れなのか、風で運ばれているのか、潮汐を考えないといけないのか、わかりません。私は風による流れではないかと解釈しています。今回は生物屋から見た特徴として、お話をさせて頂きました。

以上