

赤潮に関する研究成果と今後の研究課題

九州大学 名誉教授 本城凡夫

赤潮に関する研究成果と今後の研究課題としてまとめております。有明海海域においてシャットネラは、1984年8月に複合赤潮を形成して以来、今日までに本種の赤潮は恒常化の傾向を示しています。そのため、シャットネラを中心に話をすることになるかと思えます。

有明海におけるシャットネラ赤潮の発生機構に関してですが、この話をするのに私は非常に悩んでおります。本種の研究が盛んに行われてきた瀬戸内海播磨灘での知見と比較して、あまりにも大きく異なっているからです。図1は2007年、昨年の赤潮の発生経過を佐賀県から送っていただいたデータで整理したものであります。図の縦軸はシャットネラ細胞の密度を対数で表示したものです。だから、1が十、2が百、3が千、4が1万細胞/mlに相当します。横軸に月日を表示していて、6月の初旬から9月の初旬までです。赤潮はどの時期に発生したかという、8

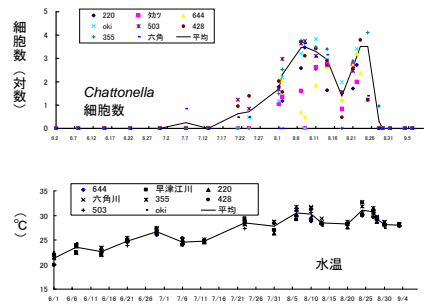
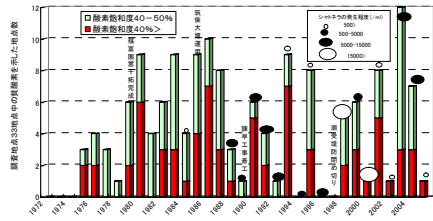


図-1

月6日から10日頃にまず1回、その後に2回目の赤潮を記録しています。下の図の水温は縦軸が15°Cから35°Cの間となっております。このように6月から徐々に上昇して、ここは25°C、そして8月になると30°Cまで達しています。最高水温の条件下で2007年の赤潮は発生していることとなります。毎年、シャットネラ赤潮が発生する季節はこのお盆の頃で、多くの海域でほぼ共通しています。10数年間のデータを佐賀県の川村嘉応さんに整理して頂きましたところ、7月に発生した時が1回だけあります。ですから、研究者は何故この季節なのだろうと考えなければならないのですが、これまでの多くのシャットネラの赤潮は8月に発生しており、大体お盆赤潮と考えて宜しいと思えます。

1980年代初旬に九州大学農学部の石尾先生が学会講演要旨で、1980年代以前に、有明海で鞭毛藻類の赤潮の発生を見た事はないと書いておられます。図2も佐賀県の過去のデータ（72年から2006年）で川村さんによるものです。縦軸は貧酸素になった地点数で、飽和度が40%から50%になった地点数を緑で、それ以下になった地点数を赤で示しており、貧酸素化が進み始めた時期を表す棒グラフであります。



有明海奥部の大潮時における貧酸素水域の形成及びシャットネラの発生

図-2

1980年に国営福富干拓干潟が完成し、筑後大堰の完成、諫早工事の着工、潮受け堤防の締め切りがこの図に記されています。1974年頃には酸素飽和量が顕著に少なくなったことはないようです。冒頭にも述べましたように、佐賀県地先で最初にシャットネラの出現が観察されたのは、この1984年で、ここに小さな丸が書いてあります。実際にはもう少し前に諫早湾の近くで観察されたことが長崎県の資料に残っているようですが、このように、有明海のシャットネラ赤潮は、瀬戸内海に比較して、新しい事象なのです。1990年の少し前から本格的に赤潮の発生は始まったという事です。私が現在の瀬戸内海区水産研究所の赤潮環境部長をしておりまして少し前まで、瀬戸内海の播磨灘で大規模なシャットネラ赤潮が発生して大きな被害が出ています。それは1972年の40億円に近い被害に始まり、それから16年間ほど発生し続けてきました。実は、瀬戸内海でのシャットネラの赤潮が終焉した頃から有明海で発生しているという事です。ですから、自ずと研究の情報が多のは、瀬戸内海、特に播磨灘です。播磨灘の発生仮説を基にして私は有明海の研究に取り掛かろうとしたのですが、その期待は無残にも打ち破られたことをこれから話します。

最近、私の研究室で得られた成果を図3に示しています。シャットネラは窒素とリン、それからその他の栄養素を十分に添加した培地でも鉄を加えなければ、増殖速度は極端に低くなります。この成果は、初めてではなく、岩崎英雄先生、岡市友利先生、そして

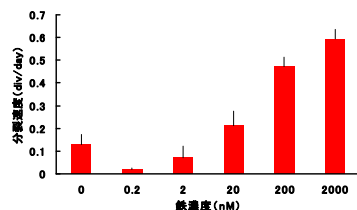


図-3

私が1980年代に同じような成果を報告しています。ラフィド藻類の一種、ヘテロシグマはマンガンでも増殖しますから、鉄に変わる物としてマンガンがあるのかもしれない。まず鉄が200 nM程あれば、高いスピードで増殖することをこの図は示しています。特に鉄は増殖を促進するという事です。縦軸は分裂速度です。例えば27 nMという濃度で鉄を培地に添加した時には1日にほんの0.2回分裂ですが、2000 nMを添加すると0.6回は分裂します。そういうふうに増殖速度が増してくるわけです。ですから、本種の増殖に鉄を無視することはできない。発生機構を考えるうえで、重要な栄養物質であるように思います。

次に、赤潮が有明海で発生するためには、シャットネラのタネ（シスト）がなければならぬという事です。2000年に赤潮が発生し、2001年6月の有明海におけるシストのデータを瀬戸内海水研がまとめています（図4）。塩田川の近くや諫早湾に大きな丸があり、1立方センチメートル当りに250以上のシストが泥の中にありました。ところが、図5に示すように2002年になるとそのシスト密度は半分ほどに減っているのです。2001年に赤潮は発生していませんので、1年間で泥の中のシストは減少したことを示しています。それでも私はこのように2年間シストが残っているから赤潮になる可能性があるかと予想していたわけですが、2001年にも2002年にも赤潮は発生しませんでした。確かにシストとそれから発芽した栄養細胞がない事には赤潮は発生しません。水産庁は播磨灘のデータを総合して発生に関する仮説を立てています。

シストは15から20℃になると、発芽する。発芽直後の細胞は小型細胞ですが、いつのまにか大型細胞に変化して核のDNA量が2倍になる。この大型細胞が栄養分裂を繰り返して現存量が少し増えてきます。このような状態のときに、栄養物質の供給のイベントがないとこの分裂は一気に加速され

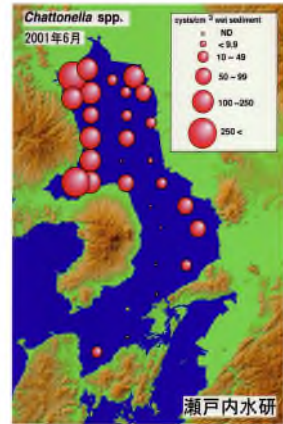


図-4

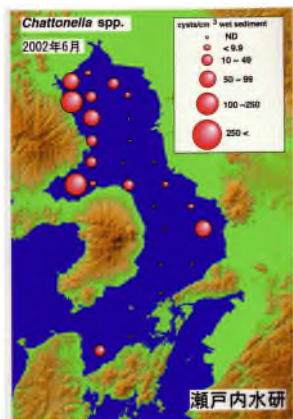


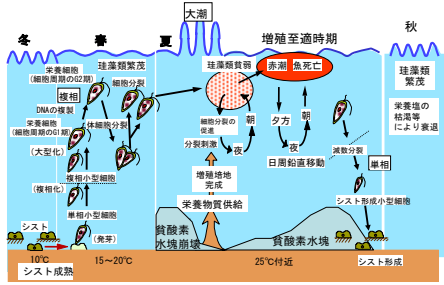
図-5

ないという事が過去の研究成果にあります。播磨灘では強風による攪拌であるというふうに結論付けられています。台風のような強風による泥の攪拌の後に栄養物質が供給されて発生するという事でありませう。それで一気に増殖をし、養殖魚に被害を与えて、海水の栄養物質がなくなってくると、一部の細胞から小型細胞が生じ、この小型細胞から形態のまったく異なるシストになり、越冬してまた春を迎えます(図6)。

播磨灘の場合には泥の攪拌による栄養物質の供給ですが、有明海の場合には、大潮のときに貧酸素水塊が形成されても崩壊しやすいと考えて、小潮の時の貧酸素水塊の形成と大潮での崩壊による栄養物質の供給が赤潮を促しているのではないかと、赤潮が終わったときに深刻な貧酸素酸水塊ができるというこういうシナリオを立てていたのであります。「ここになぜ降雨をあなたは入れていないのですか?」と聞かれるかもしれませんが、実は、大半の研究者が播磨灘では降雨との関わりについて触れてこなかったのです。それだけ赤潮は降水と関係ない海域環境で発生しているという事になります。

栄養供給についてここで追記します。有明海の奥部は浅いのでシャットネラは日周鉛直移動によって夜間に底泥まで到達することが佐賀大学の観測で分かってきました。窒素、りん、鉄などの栄養物質を泥の間隙水から直接摂取している可能性が十分にあります。風による攪拌や後述する降雨による陸上からの栄養供給との兼ね合いがどのようになっているのか、今後の研究に期待したいところです。

そこで、有明海の場合、貧酸素水塊が2007年の赤潮の発達開始期に発生していたと仮定して研究を試みてみました。図7のデータの定点は大



瀬戸内海の研究から想定される有明海における Chattonella赤潮発生機構

図-6

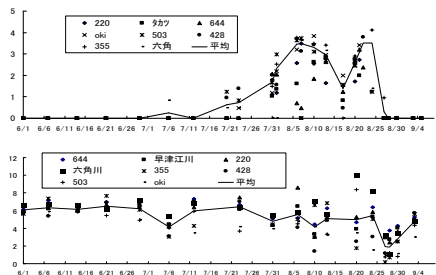


図-7

浦から六角川に至る佐賀県の調査データを全て加えて整理したものです。シャットネラ細胞の増殖開始時期はここです。対数増殖的に増殖しています。最初に出現が確認されたのは佐賀県の大浦から鹿島の間の所で、1リットルに数個でした。ですから、本格的な増殖はかなり期間を置いて始まっています。その時に少し酸素が低くなって回復しています。この4ミリグラム／リットルほどの酸素濃度でもって十分な栄養量はこの水塊に含まれてはいないと考えられます。酸素が減少していることは泥の中は還元状態であり、直上の酸素は無酸素に近いと想像はできるのですが、その証拠はありません。そうしますと、増殖の開始は何に一致してくるのかという事になります。また、先程シストは250個／立方センチメートルというような数で泥の中に2001年には存在していました。しかし、2004年には、シストの存在はついにこの点だけに限られ、しかも9.8個／立方センチメートルというような数に減ってしまっています(図8)。

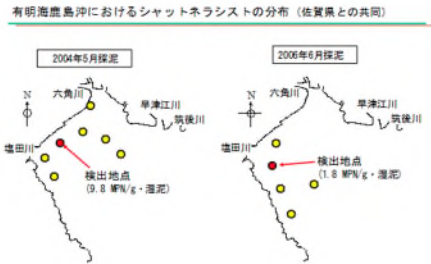


図-8

2006年に再び調べてみましたが、この点だけで1.8と非常に低い細胞のシスト密度、2007年6月には検出されませんでした。シストが極端に少ないので、赤潮は発生しないであろうと関係者間で話をしていたところに、予想に反して発生をしたのであります。

図9に示すように、播磨灘での仮定と異なり、増殖初期に塩分が大きく下がっています。この塩分の低下とその後の回復が増殖の開始と非常に合っています。この時期に無機窒素やリンは十分な濃度で存在していました。有明海の鉄に関するデータはあります。今日、会場に配布されている年報を見て戴きますと、平成19年度のこの年報に鉄に関

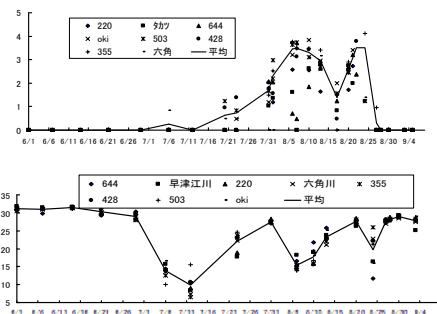


図-9

がお書きになっています。珪藻スケルトネマ赤潮についての報告です。海水中には、利用可能な溶存鉄がかなり存在する、塩分の低いあるいは底層の貧酸素水塊の中に溶存鉄が存在していると書いてあります。そして、スケルトネマだと思いますが、大量に吸収したのでしょうか。細胞内に鉄がたくさんある結果になっています。ですからスケルトネマが川から入ってきた鉄を利用したということになり、シャットネラが利用できる鉄が塩分の低下した海水の中に十分あると考えると不思議ではありません。

この時期にシャットネラも増殖し始めていますが珪藻も同時に増えています。塩分が低くなった時に、河川からの栄養物質を利用してシャットネラは珪藻と一緒に増殖しています。第1回目の赤潮の時には両方が複合してピークを迎えています。第2回目の時には珪藻は多く混在していません。2007年のデータを見る限りにおいて、どうしても塩分の低下と赤潮発生との関連を考えなくてはなりません(図10)。でも、2002年に有明海でシャットネラ・アンティ

カが出現しているのですが、シャットネラが出現している時の水温と塩分は紫色で示したところ(図11)。塩分は30です。対数増殖期中期に相当し、塩分が非常に高い時に出現しています。年によって淡水の時の影響と、他の影響がきっかけとなって赤潮となる事があるのかもしれませんが。2007年の環境特性も踏まえて今後の研究を進めていかなくてはならないと私は思います。

本日お見えになっています長崎大学工学部の冨田先生が、筑後川の影響を受けて諫早湾のこの辺りの塩分が低下したと主張されています。筑後川の流量と諫早湾の塩分低下が非常に密接に関連しているという事であります。一方、諫早湾のシャット

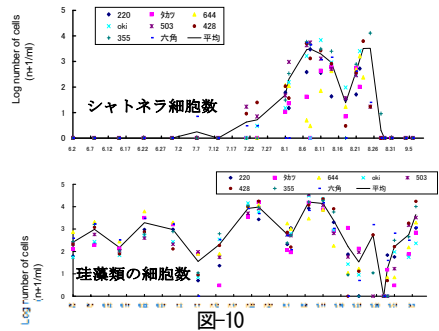


図-10

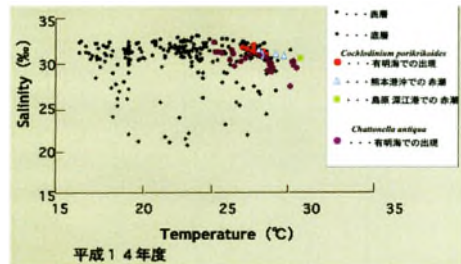


図-11

トネラの赤潮はどうだったかと言いますと、農村振興局の毎日のデータから、シャットネラの赤潮はやや低い塩分の水塊の中で発生していることは確かです。すでに話をしましたように、多田先生は塩分の低下とシャットネラ赤潮発生との関係を示唆されております。

今回2007年のデータの発生を見てみると、塩分と一致している。スケルトネマと鉄の関係は田端先生が報告されていますが、シャットネラと鉄との直接の関わりを示すデータは多くありません。もうひとつはシスト密度が、赤潮発生に反映しなかったという事です。ですから、シストから発芽した細胞は極端

に少なくとも、発芽してから後の初期個体群が赤潮へと発達し始める時の好適環境の持続が非常に大事であろうと思います(図12)。また、瀬戸内海の播磨灘における発生とは別の仮説と言いますか、雨量との関わりを検討しなくてはならないと思います。瀬戸内海の播磨灘の仮説とは合致しないのですけれども、周防灘では雨との関わりが報告されています。八代海の場合も球磨川の出水とシャットネラ赤潮との正の相関が報告されています。

本講演の後に、有明海と八代海で本種の予察手法と赤潮の移動に関する知見が報告されていますので、追記します。

中嶋・他(2009)によって、諫早湾において8月に発生するシャットネラの赤潮はその直前である7月下旬の一週間において塩分が低下していない年に発生していることが分かってきました(7年間のデータ)。この1週間の塩分低下はその10日前(7月中旬)の有明海奥部の河川からの淡水流入量に応じて変動するようですから、諫早湾の塩分を大きく低下させない降水雨量の有無で発生を判断できる可能性があります。この予察手法とは解析期間が異なりますが、松原・他(2011)は有明海佐賀県海域の15年間のデータ解析により、7月上旬の合計降水量が低くかつ平均全天日射量が高い年での中率8割、これに5月の全天日射量が高いという条件を加えたと的中率9割という予察手法を発表しています。一方、八代海におけるシャットネラ赤潮に対して、冬の気温が高くて、梅雨入りの遅い年に大規模な赤潮が発生するという予察手法(Onitsuka et al. 2015)が開発されました。しかし、有明海

研究成果と今後の研究課題-1

2007年に発生した*Chattonella*赤潮

1. 発生の開始は降雨による塩分の低下と一致する。
2. *Chattonella*は増殖に鉄を要求する。河川水に利用可能な鉄は含まれているか？
3. シスト密度は発生の確率になぜ反映しないのか？
4. 瀬戸内海播磨灘における発生とは別の仮説を検討する必要がある？

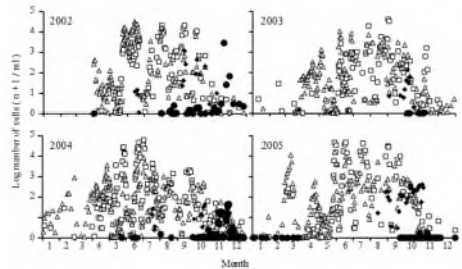
図-12

にこの予察手法は適用できないそうです。この手法は冬の高い気温の影響を持続できるある程度深い内湾にのみ適用できるのではないかと思います。

これまでの成果をまとめてみますと、本種の発生には適切な塩分低下の程度やタイミングとの関係が見え隠れしていますし、その後の好天は本種の増殖に必須な条件であるかもしれません。松原・他（2009）と松原・首藤（2013）は有明海佐賀県海域におけるシャットネラ赤潮の発達に適した環境として成層の形成、好天、小潮、南風、珪藻類の低い密度を挙げています。最後に、ごく最近、有明海奥部で発生したシャットネラ赤潮が島原半島に沿って橋湾周辺まで移動することが分かってきました（Aoki et al. 2015）。

アカシオ・サンギネア（以後、サンギネアと記す）という渦鞭毛藻類が有明海では発生して冬の海苔期に発生し、栄養を吸収して、海苔生産の被害が懸念されています。この生物の話を簡単にします。博多湾では珪藻が繁茂している時に、サンギネアは観察されなくて、晩秋の頃にピークを迎えます（図13）。本日の意見交換会に出席されています佐賀県水試の松原 賢君が本種の生理・生態に関する研究をされました。以後の話の内容は彼の研究成果です。

そして、フラスコの中で、珪藻類とサンギネアを混合して培養するとサンギネアの形態は異常をきたし、全く増殖できない形態異常細胞になってしまいます。博多湾で数多くの調査を繰り返した結果、珪藻類が繁茂する春から夏にかけてサンギネアは低い密度で分散して生息しているが、珪藻類の少ない湾口部の唐泊周辺域で初秋にまず増えて、それから博多湾の外や湾奥の方へと移っていき、湾奥で珪藻が大きく減少する晩秋にブルームを形成すると彼は結論しています（図14）。



箱崎港で *A. sanguinea* は珪藻の少ない晩秋に発生する
A. sanguinea (●), *Chaetoceros* spp. (△), *S. costatum* (□) and *A. japonica* (◆)

図-13

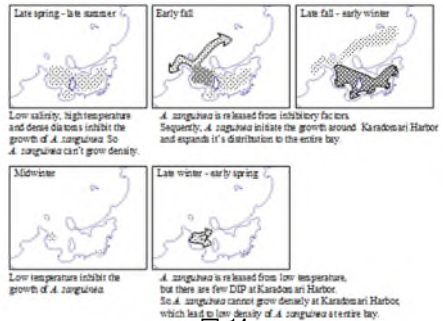


図-14

図15は、有明海のサンギネアのデータで、佐賀県に提供いただいた水質データと九州の赤潮からサンギネアのデータを引用して解析した結果です。この黒い印で示しているサンギネアの高い密度はこの時期すなわち晩秋に限られています。そして次の年も、次の年も晩秋です。この点線が新しい年変わりですから、本種の赤潮は晩秋から初冬に発生していることになり

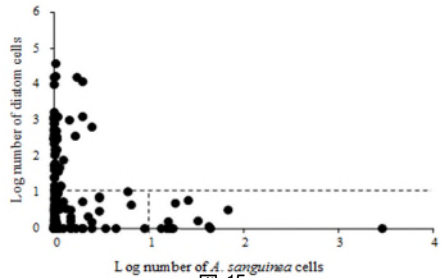


図-15

なります。しかも珪藻類がかなり少なくなった時に、本種は出現します。博多湾と同様に有明海でも珪藻が非常に少ない時に、サンギネアの細胞が増えて、珪藻が多い時には殆んど出現しないという関係にあります(図16)。しかも、定点503から428、355、湾奥の鹿島側

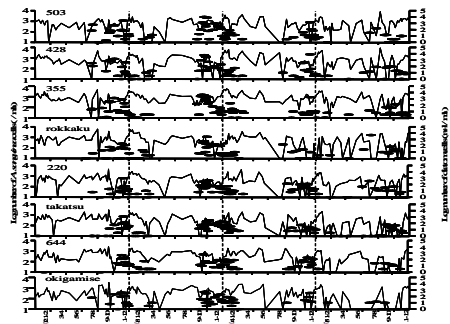


図-16

岸の六角定点よりも、220、TAKATSU、664、沖神瀬という少し東側に寄った所とは、ピークの時期がこれだけ遅れている事が分かってきました。それで、恐らく諫早湾口域で発生したものが、奥へと移り、それから東側へ広がっていったであろうと考えられます。博多湾の研究結果から想定して、珪藻が少なく塩分が非常に高い諫早湾口域で最初に出現したことから、奥部海域ではなく、諫早湾口域が初期発生海域ではなかと彼はまとめております。

博多湾と有明海では共通して塩分の高い晩秋に発生するという事は、共通しているのですが、有明海の方が博多湾に比較して圧倒的に細胞密度が高く、これはなぜかという疑問が生じます(図17)。もともと無機の窒素やリン濃度は有明海で高いという

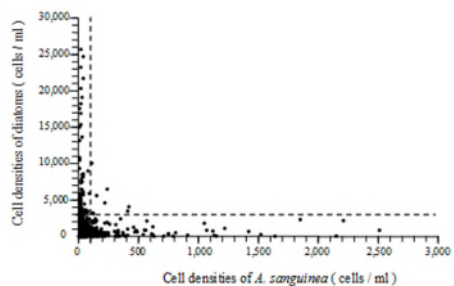


図-17

こともあります。これに加えて、サンギネアは非常に多くの鉄を要求するという文献があります。有明海の方が博多湾よりも利用可能な鉄濃度が高いため細胞密度が高いのではないかと予想されますが、今後の研究が必要です。次に、珪藻類の産生するアレロパシー物質が細胞接触によってサンギネアは強い増殖阻害と形態変化を受けました。最近、珪藻スケレトネマ属が非常に低分子のアレロパシー化合物を分泌していることが分かってきています。(図18)

海苔の色落ちへの関与が危惧されているサンギネアの研究もシャットネラと同様に大切でありまして、石尾先生が記述されておられますように、1980年代には、鞭毛藻の赤潮は発生していなかったとあります。しかし、このサンギネアもまた1980年代中期から頻度高く発生するようになりました。本種の発生についてどんな対策を打てば良いかという事になります。私には本種の発生防止対策は分かりませんが、諫早湾口におけるサンギネア細胞密度の動向を監視することによって湾奥の発生を予測することもひとつの防止策になるのではないかと考えているところです。(図18)

2000年に発生したリゾソレニア・インブリカータの規模の大きな赤潮はその後発生していません。有明海の場合、過去に注目されてきたのは冬の海苔期に発生して被害を与えているコスシノディスクスやユーカンピアといった大型珪藻の赤潮でしたが、これらに加えて大型の珪藻アステロプラヌス・カリアヌスが塩田川河口から有明海奥部を中心に発生するようになり、佐賀県有明海振興センターで研究が進められています。佐賀県や福岡県では海苔期の調査が行われてきましたので、夏季シャットネラ赤潮の調査は限られていました。ですから、瀬戸内海よりも、こういう夏の赤潮に関するデータは少ないと思います。でも最近、次々と連続の精密データが収集され始めていますから、国と4県が集まって、大きな有明海を高所から眺めながら、このシャットネラやサンギネア赤潮の発生機構の解明と被害防除防除技術の開発が進展することを切望する次第です。

研究成果と今後の研究課題-2

*Akashiwo sanguinea*赤潮

1. 博多湾と有明海では共通して塩分の高い晩秋に発生する。
2. 有明海でなぜ細胞密度が高いのか？
3. 珪藻類の産生するアレロパシー物質によって増殖阻害を受ける。
4. 博多湾の初期発生海域は湾口部、有明海の場合は諫早湾口域か？

図-18