

海の影の主役，ケイ素

角 皆 静 男*

1. はじめに：環境問題に絡む海のケイ素

化学が絡む環境問題としては、水銀による水俣病とか、カドミウムによるイタイイタイ病とかの例が示すように、人間が環境にこれまでになかったような量の化学物質を持ち込み、これまでになかった病気や障害を引き起こす問題を指すことが普通である。ここでは、それとは違い、地球に多いケイ素が、海の中の生物や人間が生きる営みをしている際に重要な関わりを持ち、人間がそのバランスを崩すと問題が生ずる（人間に害を与える）例を挙げてみようと思う。そのため、まず地球上のケイ素について少しおさらいをする。

今は消えてしまったようだが、1950年頃に小学生だった私が使っていた参考書に、地球表層部（大気、海洋、地殻）の元素組成を表すクラーク数（%単位の平均値）の表があった。1位は酸素（50）、2位はケイ素（26）、3位がアルミニウム（8）、4位が鉄（5）だった。つまり、これら4元素が地球表層部の9割近くを占め、岩石の主成分のケイ素が4半分を占める。なお、地球全体では、核に鉄（34）が多いから、酸素（29）、ケイ素（15）と続き、次はマントルに多いマグネシウム（13）で、アルミニウムは1%台に下がってしまう。

岩石の主成分であるケイ素は、アルミノケイ酸塩として存在するが、水に難溶である。水に対する無水ケイ酸（シリカ）の溶解度は、0℃で3 mg/kgでしかない。しかし、溶解度の水

温依存性が大きく、25℃にすると、0℃の4倍溶ける。この違いにより、岩石は、寒帯では風化が遅く、熱帯では酸化鉄を残してだんだん溶け、流れ去る。

また、概して地表近くの方が高温で風化が早く、低温の深所では2次鉱物が析出し、沈着する。例えば、深成岩の花崗岩が風化すると、粘土鉱物のカオリナイト、カオリン石になるが、この名は中国景德鎮の高嶺（カオリン）に由来し、そこは磁器の産地、良質の陶土の産地である。世界の陶磁器の有名な産地はすべて温帯地方であって、寒帯や熱帯地方にはない。これはケイ酸塩の溶解と二次鉱物の粘土の形成が水温に依存するからである。

そのうえ、常温でもいくらかは水に溶けているケイ素、溶存ケイ酸は、生物に摂取されやすいので、太陽光が届く表層海水中の溶存ケイ酸濃度は極めて低い。生物に摂られたケイ素は、ケイ藻などの殻となり、死ぬと、生物の遺骸とともにほとんど溶けずに海底に沈降し、海底上や海底土中で溶けて海水に戻るが、溶けきれないものは堆積する。

その結果、大洋水中の溶存ケイ酸濃度は、深さと古さ（潜ってから経過時間）とともに増加する。深層水の溶存ケイ酸の鉛直分布に極大層が見られるが、浅い海の海底で溶けたものが水平移流で運ばれてきたものである^{1,2)}。暖かい海の有光層中のほとんど0 μM (M は moles/l) から、大西洋では、深層水での50 μM

*北海道大学名誉教授，財団法人海ロマン21副理事長

第32回石橋雅義先生記念講演会（平成24年4月28日）講演

まで、太平洋では、深層水での $200\mu M$ まである。なお、最高の海水は、縁辺海のベーリング海の底層水で $200\mu M$ を超すが、 $300\mu M$ を超す海水はない³⁾。また、海底堆積物の間隙水中では $1mM$ を超す飽和濃度になっている場合もある。

地球史をひもとくと、6600万年前、暖かい恐竜の時代の中生代が終わって、新生代に入った。しかし、まだしばらくは暖かかった。そして、5500万年前を頂点にして、地球は、極域を中心に三段跳びで冷えていった。そして300万年前、氷期間氷期が周期的に交代する時代に突入した。この間、大気中の二酸化炭素濃度は減り続け、氷期に180ppm、間氷期に280ppmと周期的変動を繰り返すようになった。ところが、人類が産業革命を起し、化石燃料を使うようになると、一転して増加し始め、現在、400ppmとなった。地球大気中の二酸化炭素濃度は、その赤外線吸収効果、温室効果により、地球表層部の寒暖と密接に関係する。

2. 溶存ケイ酸が北の海の春（ケイ藻ブルーム）を開け、閉める

新生代に入り、地表や海洋表層が冷えると、陸ではイネ科の植物、海ではケイ藻類が優占種になった。イネはケイ酸で硬い茎を、ケイ藻類はケイ酸で殻を造る。寒いとケイ酸は溶け難くなり、植物は手に入れ難くなるが、その利用法をうまく工夫したものが競争に打ち勝って優占種になったものと私は考えた（角皆仮説1⁴⁾）。

さらに、新生代の海では、比較的大きな植物プランクトンであるケイ藻から始まり、大型の動物プランクトン、小魚、大魚と続く食物連鎖が最強となった⁵⁾。ところが、後述するが、ケイ藻類だけが増えると、海水の栄養塩のうち、ケイ酸塩がリン酸塩や硝酸塩より先に枯渇して

（ある閾値以下になって）しまい、ケイ酸塩を必要としない小型の鞭毛藻、渦鞭毛層類から始まり、小型の動物プランクトン、それを食べるクラゲなどに至る食物連鎖に取って代わると私は考えた（角皆仮説2⁴⁾）。

これら二つの仮説における海の植物の主役はケイ藻類であり、それは日本の春の花の主役、サクラに相当する。なぜケイ藻類がパッと咲いてサッと散るサクラに相当するかを説明する。

真水は $4^{\circ}C$ の時に最も重い、海水は温度が下がれば下がるほど重くなる。従って、冬の冷却期には水温が均一になるように対流が起って結氷するまで冷える。オホーツク海などで結氷が始まると、できた氷は浮き、表面を覆うので、状況は複雑になるが、塩がはじき出され、重い高塩分氷は沈むので、海水の鉛直混合は加速されるとみてよい。

下層水は、有機物が分解し、再生した栄養塩、肥料分の濃度が高い。この対流による鉛直混合は、その栄養塩を表層に運ぶ。冷却中は、水中の植物プランクトンは止まっていられないので、増えない。春になり、表面水が温まり出すと、水の鉛直混合が止まり、植物プランクトンが下層に引きずり込まれなくなるので、この有光層の栄養塩を使って急増殖し、表層（有光層）は、春にサクラが咲いたようなブルームの状態になる。

上記のように推移することを北海道の噴火湾で実証した⁶⁾。噴火湾（内浦湾ともいう）は、青森県尻屋崎と北海道襟裳岬の間の外浦の奥にある丸鍋状の湾で、東京湾の10倍量の水を湛えている。その1/4周ほどが外浦に開け、外浦から春に親潮系水が、秋に黒潮系水が入ってくる。1981年1～5月に1～2週毎に、その最深92mの湾中央に北海道大学水産学部のうしお丸100トンで観測に出かけた。

表層30m層について積分したクロロフィルa量もしくは懸濁粒子量を図1に示す。この時期は、どちらも植物プランクトンの存在量を表しているといえる。これらの値は2月になると増え始め、3月には2週毎に倍増する勢いで増え、3月中旬にブルームのピークに達した。その後は、週毎に半減する勢いで急減し、4月中旬にブルームは消えた。

しかし、減ったのは植物だけで、図2に示すように動物プランクトンは、4月から5月にかけて増え続けていた。すなわち、3月末に植物が消えたのは、動物に食べられたからではなかった。図3は、リン酸塩の濃度で、ブルームの3月中旬に急減するが、再生したり、下層から上がってきたりするリンもあって、生物生産は続いていた。これは栄養塩の収支計算で確かめたし、図は省略したが、3月末に減ったのはケイ藻類だけで、鞭毛藻類や渦鞭毛藻類は、逆に増えていた。

一方、図4に示すように、海水中のケイ酸塩濃度はリンとは大きく異なり、3月末に減ったまま夏を迎えようとしていた。つまり、3月末

にケイ藻の世界が終わると、ケイ酸塩は再生しにくいということもあろうが、8月末に外海から入ってきた水が噴火湾の底層水を巻き上げ、秋のケイ藻類の二次的ブルームが始まるまではケイ藻類の増殖は見られなかった。

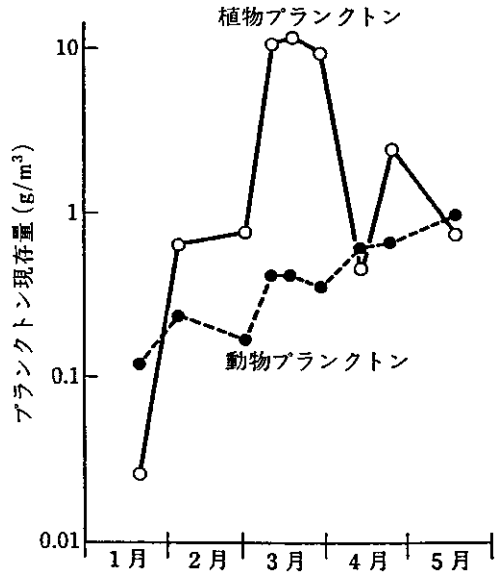


図2 噴火湾における植物および動物プランクトンの現存量の推移 (図1と同時に観測)

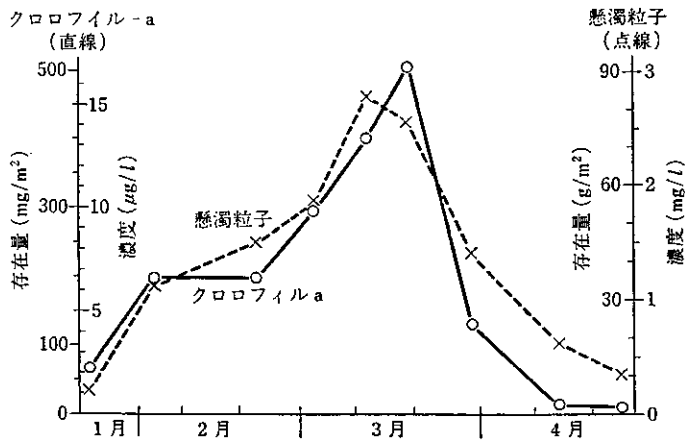


図1 北海道噴火湾の湾央部で1981年に捉えた植物プランクトンの春のブルーム (表層30mにおけるクロロフィルaと懸濁粒子の存在量と平均濃度の推移)

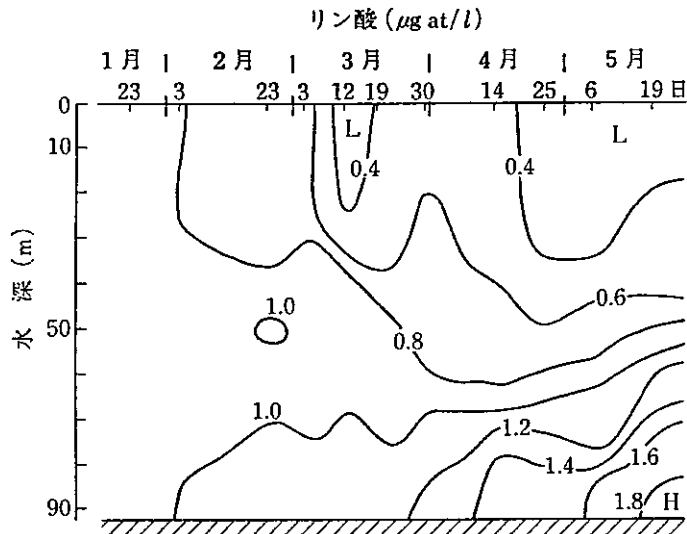


図3 噴火湾におけるリン酸濃度の推移 (図1と同時に観測)

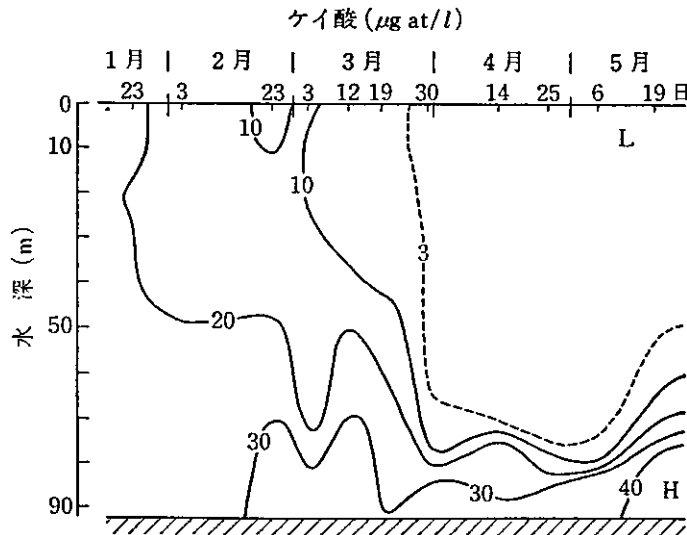


図4 噴火湾におけるケイ酸濃度の推移 (図1と同時に観測)

3. 英語名にRがある月にしか生牡蠣は食べられない

噴火湾のホタテガイの貝毒は、渦鞭毛藻の *Alexandrium tamarense* などが作ったフグ毒と同じ麻痺性の毒を中腸腺などに貯め込んだものにより、MU (マウスユニット) 単位で表す。

1 MU は体重20g のマウスを15分で死なせる量である。噴火湾内外の観測点では、毎週1回以上ホタテガイの中腸腺を含むむき身の貝毒を量っている。なお、下痢性貝毒は、中腸腺を取り除けば除去できる。

そして、20MU/g を超す値が出たら、調査

点数の増加，調査間隔の短縮等監視体制を強化すると共に，高い値が出た原因を突き止める。精査しても，4 MU/g を超える場合は出荷の自主規制を行う。中腸腺を除くなどして4 MU/g 以下になれば，ホタテガイは認定処理場に送ることができる。

図5は噴火湾内外の養殖場から得たホタテガイの貝毒値である。4月中旬から増えだし，5月下旬には，150MU/g を超え，収穫できなくなってしまう。これは，まさに噴火湾の生態系が3月のケイ藻類のブルームで海水のケイ素が枯渇し，ケイ藻類が消え，残ったリンや窒素の化合物を使って渦鞭毛藻類が殖え，有毒赤潮が出現した結果を映している。

従って，人間活動によって富栄養化が進めば進むほど，ケイ酸はふえないから，ケイ藻以外の藻類が増えることになる。その藻類として，有毒な渦鞭毛藻が増えたのが有毒赤潮であり，それを食べて蓄積したのがホタテガイの貝毒で

ある。これはホタテガイに限ったことではなく，カキ（牡蠣）でも同じである。また，日本に限ったことではなく，欧米でも同じである。それで，北半球全域の中緯度地帯で「牡蠣は，月の英名にrの文字がない5～8月には食べられない」と言われることになる。

4. 雲仙岳の噴火のせいで有明海のノリが不作となった

有明海で，00年12月後半から01年4月にかけて，養殖ノリが色落ちし，大きな問題となった⁷⁾。色落ちとは，本来黒色であるノリの色が薄くなり，激しい場合には，薄茶色から黄色になり，商品価値がなくなる現象をいう。日本のノリ生産量は年間約100億枚とされるが，全国で98年度に100.6億枚，99年度に95億枚，00年度に83億枚だった。有明海での生産量とそれが占める割合は（カッコ内に示す），98年度に41.4億枚（41%），99年度に36.8億枚（39%），00年度に

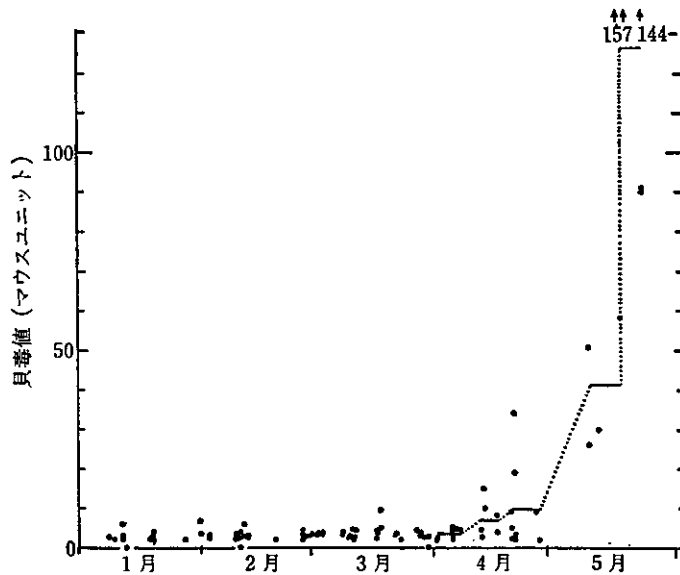


図5 噴火湾の内外の沿岸14点で1981年に得たホタテガイの中腸腺（ウロ）の貝毒値（マウスユニット MU/g），横棒は平均値である

23.5億枚（28%）と、有明海は日本のノリ生産量の約4割を占めるが、00年度に有明海でノリの大きな生産減があったことをこの数値は示している。

ノリは水温、日照、栄養塩（窒素とリン）に影響されるが、11月から3月にかけて生長する。00年12月初旬、栄養塩量（溶存無機3態窒素量）は急減し、プランクトン生体量は急増して、赤潮状態になり、色落ち現象が起きた。ノリが必要とする栄養塩は主に窒素とリンであり、これらが不足すると、まず光合成色素の含量が減少し、また、窒素とリンの濃度レベルが回復すると、光合成色素が増加する。今回有明海で起きた色落ちの特徴は、図は省略するが、12月以降大型のケイ藻類が多数、大量に発生し、かつ強弱はあるが長期にわたって、窒素とリンがない状態が続いた点である。

こうなった原因は、00年の夏は、高温・多雨だったので、ただでさえ新鮮で溶解度が大きい雲仙普賢岳の噴火による火山灰から、多量のケイ酸塩が溶け出して海に流れ込み、ケイ藻が異常増殖し、ノリにいくべき栄養塩を使ってしまったということである⁸⁻¹⁰。そこで、雲仙岳の噴火について記しておく。

雲仙普賢岳の噴火の記録は、主に津波によって15,000人の死者を出し、島原大変肥後迷惑として伝えられる1792年の雲仙岳眉山の山体崩壊とこれによる津波災害以外はあまりない。

後に平成新山と名付けられた噴火活動は1989年11月橘湾群発地震に始まり、1990年11月に噴火したものの小康状態だったが、1991年2月に再噴火し、以後噴火を拡大していった。5月に最初の土石流が発生し、噴火口に亀裂が入り、溶岩ドームが形成され、崩壊した。そして、絶え間なく供給される溶岩が山頂から垂れ下がり、新しいマグマに押し出され、火山ガスとともに

山体を時速100kmものスピードで流れ下る火砕流を引き起こした。これが1995年3月まで続いた。この間、1991年6月に死者43名を出す火砕流（それ以外は死者1名）があった。

火山爆発による火山雷とともに真っ黒の雨が降る（火山灰が雨となって降ってくる）現象もたびたび観測されて、有明海を挟んだ熊本空港でも西風の影響で火山灰が観測されて航空機の離発着に影響が発生したこともたびたびあった。2000年は高温で多雨だったので、いつもよりずっと多いケイ酸塩を河川水や地下水が海に運ぶに違いない。

さらに、この雲仙普賢岳の噴火による火山岩、特に新鮮な火山灰からのケイ酸塩の溶解速度と溶解度は、深成岩や変成岩に比べて大きい。もし2億m³の火山噴出物の0.1%が溶け、1,700km²の有明海の全表面水に等しく混ざったとすると、厚さが20mなら100mol/l、200mでも10mol/lも溶存ケイ酸塩濃度を増加させたことになる。従って、上記の高温・多雨の効果をさらに強めた可能性がある。

5. 中国が造った三峡ダムでエチゼンクラゲが大発生した

私は学生時代、クラゲは腔腸動物と教わった。今はイソギンチャク、サンゴなどと共に刺胞動物に分類されている。刺胞動物は固着して触手を広げ、無性生殖をするポリプの時代と有性生殖をするクラゲの時代とをもつ。

成長すると傘の直径が1mを超す世界最大級のエチゼンクラゲもポリプの時代があって、そのポリプは東シナ海の長江河口域周辺および黄海の沿岸海域の海底に固着している。そして春にクラゲになると、海面に浮き、対馬海峡を抜けて日本海に入り、対馬暖流に乗って北上し、一部は津軽海峡を抜けて南下する。そしてクラ

ゲは1年以内で死ぬ。

エチゼンクラゲ大量出現が1920, 1958, 1995年に記録され, 21世紀に入ると毎年のように発生し, 2002, 2003は大きな被害をもたらし, 2005はさらに上回る量が出現したが, 2008はほとんど発生しなかった。これだけ大きな変動の遠因は, 東シナ海, 黄海におけるエチゼンクラゲのポリプにあるのだろう。

中国は, 長江中流に巨大な三峡ダムをつくった。ダム湖に水が滞留している間にケイ素は植物に摂られて減るが, 窒素とリンは摂られても再生するので, ダムはクラゲの出やすい環境を造ったことになる。それで, 三峡ダムについて書く。もちろん, もう1つの原因, 処理しない汚水, 排水の増加もある。黄海, 東シナ海の海岸や河口近くを歩けば, 鼻をつく悪臭に襲われる。

1919に孫文が三峡ダム建設プロジェクト提唱するが, 進展しなかった。1931に長江大洪水があり, 死者13万5千人, 家屋流失200万戸だった。1950に予備調査を開始した。1954にも長江大洪水があり, 死者3万人, 100万人の家屋が流失した。1956に調査が終わった。1963に着工方針を発表したが, 進展しなかった。1983に三峡ダム事業化調査報告が出た。1989に長江-三峡工程論争が始まった。1992に全人代が着工を採択した。

1993に第一期準備工事を開始し, 1994に着工式, 本工事と進めた。1997に第一期工事が完了し, 長江本流を堰止め, 第二期工事を開始した。1998に長江大洪水があり, 死者1320人がでた。2003に第二期工事が完了し, 一部湛水一部発電を開始し, 第三期工事を開始した。2006に三峡ダム本体が完成し, 2009に完成し, 2012に水力発電フル稼働を開始した。

ダム湖は, 湖北省宜昌市街の上流から重慶市

街の下流までの約660 (570) kmの長さがあり, 通常水位は175mである。発電ブロックの長さは, 右岸が584m, 左岸が644mで, 放水ブロックの長さが483mで, コンクリートの使用量が2,700万 m^3 だった。

70万kWの発電機が32基あって, 発電能力は2,250万kWで, 1,000億kWhの年間発電量を予定している。中国の年間電気エネルギー消費量が約1兆kWhの1割を賄える。因みに日本の年間電気エネルギー消費量も約1兆kWhであり, 火力なら石油1,750万トン, CO₂排出5,450万トンになる。

この三峡ダムが完成した頃, 黄海や東シナ海沿岸域の汚染が深刻になり, エチゼンクラゲが大発生するようになった。

6. 浅海底が石灰で覆われる磯焼けも富栄養化が原因か

最後に海底の岩や石は関係するが, ケイ素とは直接的には無関係(多分)の「磯焼け」を取り上げる。

磯焼けという語は知っていたが, それがかなり深刻な事態に陥っていると初めて聞かされたのは, 1988年に鹿児島に行ったときだった。磯のワカメやコンブなどの大型海藻が駆逐されて, 石灰藻(無節サンゴモ)が浜や波打ち際の海底を覆ってしまう現象である。この間にウニやアイゴなどの植食性の動物が絡む話はあるが, ケイ藻は登場していない。また, 磯焼けは各地で問題になっていたが, 最近, それが急拡大しているということでもなさそうだ。しかし, 沿岸域の富栄養化や汚染など人間活動とは何らかの関係はありそうなので, ここで取り上げることにする。

まず, 石灰藻の石灰は炭酸カルシウムCaCO₃のことで, 海洋には, 通常, 2つの結

晶形を持つ炭酸カルシウム、方解石（カルサイト）と霰石（アラゴナイト）が存在する。表層海水は、どちらの石灰についても過飽和であるが、方解石の方が安定で溶解度が小さい。従って、何か触媒的働きをすれば、海水から石灰が析出しうる。逆に、水圧がかかった太平洋の深海底だと方解石でも溶けてしまう。サンゴが石灰の殻を作ったときは霰石であるが、時間が経つと、徐々に方解石に変わっていく。

また、海で生物が石灰の殻を造ると、二酸化炭素（炭酸ガス）が海から大気に出てきてしまう。逆に、鍾乳洞の鍾乳石は大気中の二酸化炭素を吸って溶け、川から海に運ばれる。

なお、私は石灰藻の研究はしてないが、他のケイ素を必要としない（ケイ酸塩の殻を造らない）植物プランクトンが、ケイ藻に対して日陰者の席を占め、窒素やリンはあるが、ケイ素がない環境で初めて優占種となることから、石灰藻もそのような環境、つまり、ケイ藻がケイ素を使ってしまった環境や、人間が窒素やリンを加えた環境（富栄養化した環境）で出やすくなるのではないかと考えた。つまり、石灰藻は、鞭毛藻や渦鞭毛藻などの有毒赤潮になる藻類、ノリ、ケイ藻を餌としないクラゲ、サンゴなどと同列においてもよいのではないかということである。

これまで、磯焼けになるとコンブが育たず、痩せたウニしか育たないと言われる一方、サンゴが石に張り付く際に重要な役割を果たしているとか、ウニやアワビの幼生を変態させる物質を出しているとも言われていた。一方で、ウニによる食害が藻場の衰退、磯焼けを引き起こしているという説も出ている。

7. 終わりに

観測結果と推論とから、「海洋において、プ

ランクトンの生産に必要な物質がすべて水中に含まれていれば、ケイ藻類が最優勢種である。しかし、ケイ酸がないとケイ藻が増えられないのは当然だが、溶存ケイ酸塩濃度について $3 \mu\text{moles/l}$ 程度の閾値があって、これ以下では他の栄養塩類や条件が揃っていてもケイ藻類は優占種になれない」、さらに「いったん、鞭毛藻類などの世界になってからケイ酸塩を加えても、ケイ藻類の世界に戻れないことがある」という角皆假説をもとにして、有毒赤潮、貝毒、ノリの不作の原因、クラゲの発生、磯焼けの舞台裏を説明した。

引用文献

- 1) Tsunogai, S.: Deep water circulation in the North Pacific deduced from Si-O diagrams. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 43, 77-87 (1987).
- 2) Tsunogai, S., M. Kusakabe, H. Iizumi, I. Koike and A. Hattori: Hydrographic features of the deep water of the Bering Sea -'The Sea of Silica'. *Deep-Sea Res.*, 26, 641-659 (1979).
- 3) S. Tsunogai, S. Noriki, K. Harada and K. Tate: Vertical change index for the particulate transport of chemical and isotopic components in the ocean. *Geochem. J.*, 24, 229-243 (1990).
- 4) 角皆静男：植物プランクトン組成を決定する第一因子としての溶存ケイ素。 *北大水産彙報*, 30, 314-322 (1979).
- 5) 高橋正征：「制御実験生態系」を用いた海洋生態系の動態解析。 *海洋科学研究ノート*, No. 4, 15-21 (1977).
- 6) Tsunogai, S. and Y. Watanabe: Role of dissolved silicate in the occurrence of

- phytoplankton bloom. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 39, 231-239 (1983).
- 7) 天野秀臣：有明海のノリに起きたこと. *化学と生物*, 39巻, 12号 (2001).
- 8) 角皆静男：「川口修, 山本民次, 松田治：有明海熊本沿岸におけるノリ不作年度の水質環境の特徴」に関するコメント. *海の研究*, 11, 651-653 (2002).
- 9) 角皆静男：「川口修・山本民次・松田治・橋本俊也：水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明」に関するコメント. *海の研究*, 14, 609-611 (2005).
- 10) 角皆静男：「川口修・山本民次・松田治・橋本俊也：角皆静男氏のコメント（「海の研究」14, 609-611）に対する回答」に関するコメント. *海の研究*, 14, 665-666 (2005).