

火山周辺地域の土地利用と地域づくりのための研究調査

鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科

安達 貴浩

火山周辺地域の土地利用と地域づくりのための 研究調査

安達 貴浩

1. 本研究の目的

桜島、雲仙普賢岳、阿蘇山等の火山の活動が盛んな九州地方には、鹿児島県、長崎県、熊本県、大分県等水産業が活発な地域が多く存在する。一見何の関連性もないように思われる「火山」と「水産業」という二つのキーワードは、水環境における物質循環という科学的視点から見ると、実は密接な関連性を有している可能性がある。すなわち、火山性地帯の陸域からはシリカの供給が多いため、火山周辺沿岸海域にはシリカを必須栄養分とする植物プランクトンの珪藻類が卓越して出現するが、この珪藻類の優占が、有害赤潮を形成する渦鞭毛藻やラフィド藻の発生を抑制している可能性があり、結果的に水産生物に対して好適な漁場環境が維持されている可能性が考えられる。このような状況は土地利用のあり方によって変化するものと考えられるが、このような一連のシステムについては今のところ定性的にその存在が指摘されているのみである。以上のような背景を踏まえて、本研究では「陸域」－「沿岸域」の物質循環機構を定量的に評価し、地域計画に役立てることを最終的な目的としている。このような目的の下、具体的には、まず代表的な火山性地帯である鹿児島湾周辺地域を対象に、河川からのシリカの供給特性を明らかにした。さらに、鹿児島湾湾奥において珪藻とシャトネラとの競合関係を現地調査により明らかにした。

2. 陸域からのシリカの負荷流入特性

(1) 観測の概要

2009年6月に、鹿児島湾・北湾への主要流入河川（流量最大）である天降川を対象に、シリカ濃度の集中連続観測を行った。観測期間を6月としたのは、この時期に、*C.marina*赤潮が発生しやすいことに加えて、梅雨時期のため、流量の変化が大きく、流量変動に伴うシリカ濃度の変動特性を把握しやすいと考えられたためである。観測地点は天降川河口（新川橋）であり（図-1）、右岸側の表層水を採水し、珪モリブデン酸法により、溶存態のシリカ（以下DSi）濃度を定量分析した。なお、採水時

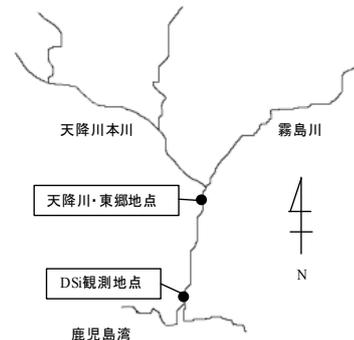


図-1 天降川の概要

に電気伝導度と水温の計測をしているが、この結果、海水の影響は全くないことが確認されている。

(2) 河川流量の推定

天降川の河川流量は鹿児島県によって公開されているが、観測期間における河川流量データは、現時点では入手不可能である。一方、天降川・東郷地点の測水所では、観測水位がリアルタイムに公開されており、さらに東郷地点よりも上流地点で合流する天降川と霧島川の過去の流量も既に公開されていることから、2006年度の天降川と霧島川の合計流量と東郷地点での水位を用いてH-Qモデルを作成し、2009年6月における天降川河口の流量を推定した（図-1）。なお、DSi濃度の観測地点（天降川河口）と、天降川・東郷地点の間には支流の合流があるが、本川と比べて流量が小さいことから、東郷地点の流量は観測地点の流量とほぼ一致するものと考えられる。

(3) 天降川におけるシリカ供給メカニズム

図-2に天降川流域内にある降雨観測所（溝辺）の降水量、天降川河口での河川流量の推定値、DSi濃度の経時変化を、図-3にDSi負荷量 L と河川流量 Q の関係を示す。これらの結果に示されるように、降雨による河川流量の増大に伴って、DSi濃度は減少するが（図-2）、DSi負荷量はほぼ一定となることから（図-3）、DSiは通常主に基底流出によって河川へ供給され、降雨時には、DSi濃度の低い表面・中間流出によって希釈されていると解釈

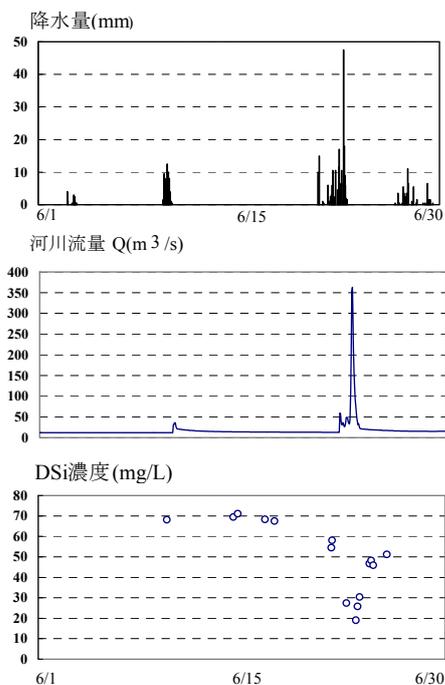


図-2 降水量、河川流量、DSi濃度の経時変化

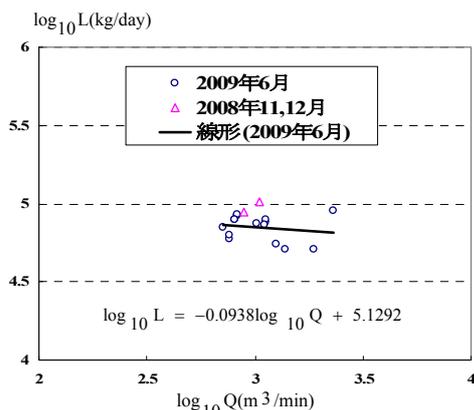
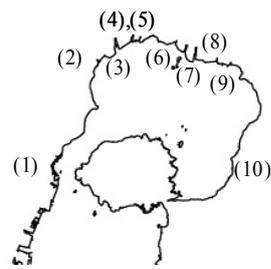


図-3 L-Qモデル

できる。火山周辺地帯における河川のDSi濃度は一般に高く、このため、人為的な供給の影響は相対的に現れにくかったものと考えられる。なお、図-3には、2008年11、12月での観測結果もプロットされているが、回帰曲線からのばらつきは2009年6月と同程度であることから、DSi流入負荷量の季節的な変化はさほど大きくないと考えられる。

ところで、本観測で得られたほとんどのDSi濃度は、30mg SiO₂/L以上であり、わが国の他の河川（約17mg SiO₂/L）と比べて比較的高い値を示している。このようにDSi濃度が高くなる原因として、流域がシラス台地で覆われていること、さらには周辺が温泉地帯であり、基底流出に含まれる物質が熱水の影響を強く受けていること¹⁾の両方の影響が考えられる。いずれにしても、このような高いシリカ濃度は、基底流出の影響が卓越することを意味しており、DSiの負荷量が流量に関わらず一定



番号	河川名
1	稲荷川
2	思川
3	別府川
4	網掛川
5	日木山川
6	清水川
7	天降川
8	検校川
9	高橋川
10	松崎川

図-4 鹿児島湾・北湾に流入する河川

となる上記の結果を支持するものである。

(4) DSi濃度の経年変化の推定

次に、同一地点における過去のDSi濃度と上記観測結果との比較を行った²⁾。過去の観測では、DSi濃度は46.2～61.4mg SiO₂/Lの範囲の値を示しているが、この期間、河川流量や流域内での降雨の観測は実施されておらず、このため上記L-Qモデルを過去の負荷量予測にも適用できるかどうかを検討することはできない。過去の観測結果は本研究の結果よりも多少低い濃度を示しているが、過去の観測では海水によるDSi濃度の希釈の影響が確認されていること、また上記のように基底流出の負荷の寄与が卓越していると考えられることから判断すると、本研究で構築したDSiに対するL-Qモデルは、過去の赤潮の要因解析に対しても十分適用可能であると推察される。

(5) 鹿児島湾湾奥に流入するシリカ総負荷量の推定

2010年2月12日に、鹿児島湾・北湾に流入する10河川の河口部において、DSi濃度の観測を行った（図-4）。図-5に各河川のDSi濃度を示す。なお、いずれの観測結果においても、海水の影響はほとんどないことが確認されている。

次に、得られたDSi濃度に基づいて、鹿児島湾・北湾に流入するDSiの負荷量を推定した。上述のように、現時点では、河川流量のデータを入手できないため、天降川については、上述のDSi負荷量についてのL-Qモデルに、測定されたDSi濃度を代入することにより河川流量を逆推定した。また、他の河川については、得られた天降川の流量を用いて、天降川流域との流域面積比から河川流量を推定した。さらに天降川と同様に、ほとんどの河川のDSi濃度が30mg SiO₂/L以上であることから、いずれの河川も基底流出に含まれるDSiが支配的であると仮

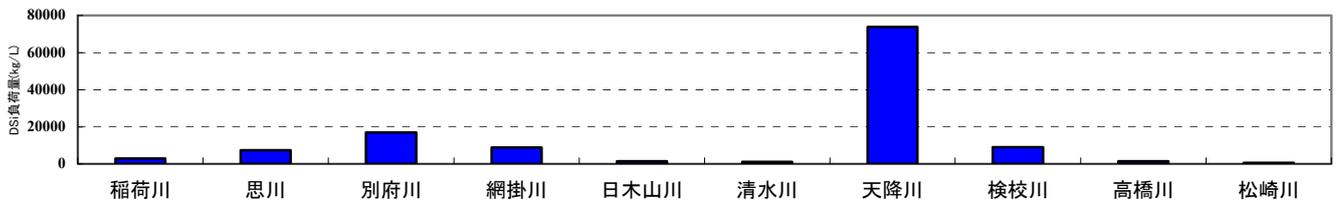


図5 鹿児島湾・北湾に流入する河川のDSi濃度

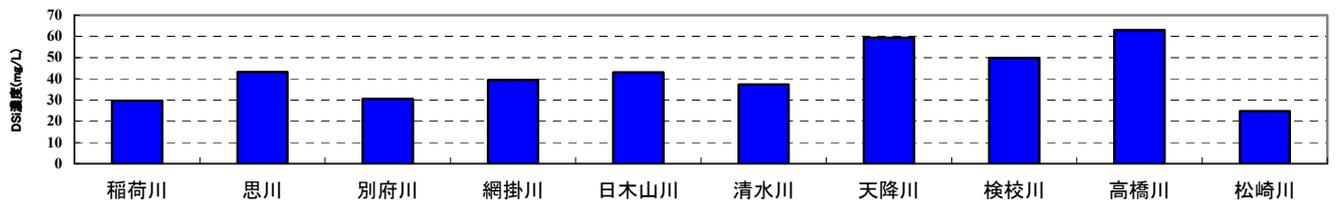


図6 鹿児島湾・北湾に流入する河川のDSi負荷量

定し、各河川から流入するシリカ負荷量を推定した(図-6)。今後、流量データの修正や適用した仮定の検証が必要であるものの、この結果、鹿児島湾・北湾へのDSi流入負荷量の大部分(約60%)を天降川が占めていることが示された。

3. *C. marina*赤潮と珪藻の競合関係

(1) 現地観測の概要

著者らは鹿児島湾湾奥部における赤潮の発生メカニズムや*C.marina*赤潮と珪藻との競合関係を明らかにするために、赤潮多発地点に観測地点を設け(図-7、Stn.A)、2007年より定点観測を実施している。塩分・水温計、蛍光度・濁度計ならびに光量子計を係留し(アレック社製・COMPACT-CT、CTW、CLW、CW)、水面下1mの水温、塩分、蛍光度、濁度の連続観測を行っている。また、ほぼ月に1回の頻度で、水深1m地点の海水を採水し、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、全窒素、リン酸態リン、全リン、珪酸塩、クロロフィルa、CODを分析し、表層とクロロフィル極大層の植物プランクトン相の観測を行っている。なお、光量子の観測とクロロフィル極大での検鏡は2009年4月から開始した。ま

た、月1回程度の割合で鹿児島県水産技術開発センターによる観測がなされていることから、Stn.A とほぼ同一地点と見なせるStn.11における観測値を必要に応じて活用した。

(2) *C. marina*赤潮発生時の栄養塩の供給プロセス

安達ら(2009)³⁾により、2008年の鹿児島湾での*C.marina*赤潮は、河川からの栄養塩供給がトリガーとなって発生した可能性が高いことが示されている。一方、渡辺(1991)⁴⁾は*Chattonella*赤潮発生時の特徴的な海洋構造として、比較的浅い水深(5~7m)に安定した栄養塩成層が存在している状態を挙げている。これは、遊泳能力をもつ*Chattonella*が日周鉛直運動(最大で7.5mまでの鉛直移動⁴⁾)することによって他の植物プランクトンよりも優位に栄養塩を摂取し、その結果、赤潮が形成されることを意味している。安達ら(2009)³⁾は、降雨と表層栄養塩の時系列データより栄養塩供給プロセスについて考察を行なっているが、渡辺(1991)⁵⁾が示すような栄養塩成層についての議論は十分でなかったことから、以下にその検討を行った。

図-8に2008年におけるStn.Aの σ_t 、およびStn.11のDIPの鉛直分布を示す(ただし、DIPはStn.Aにおける水面下

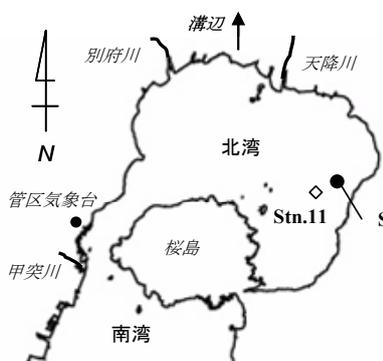


図7 鹿児島湾の桜島周辺海域

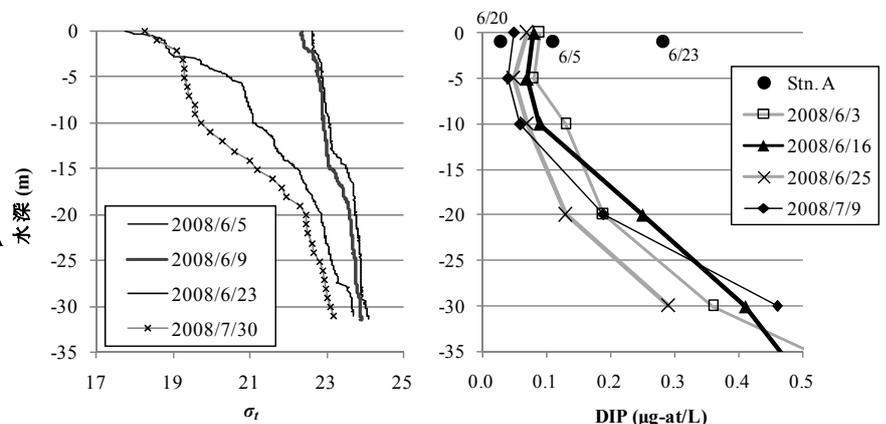


図8 2008年における σ_t とDIPの鉛直分布

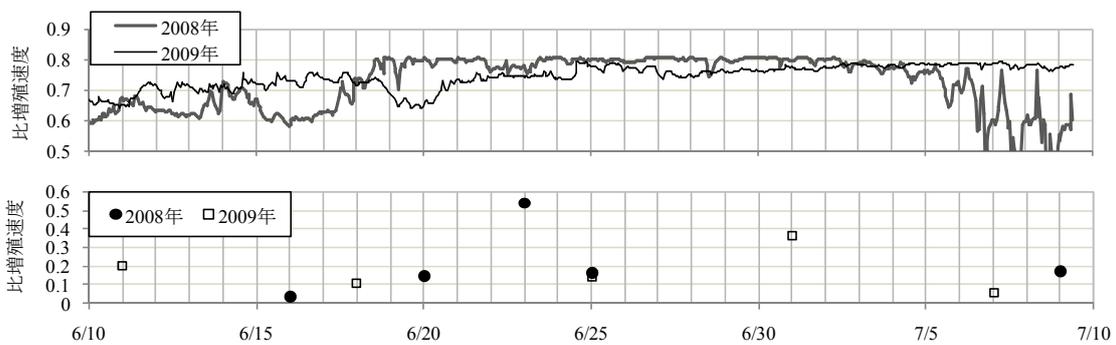


図-9 *C. marina*の比増殖速度の経時変化

(上図：塩分・水温が制限因子となる場合、下図：栄養塩が制限因子となる場合)

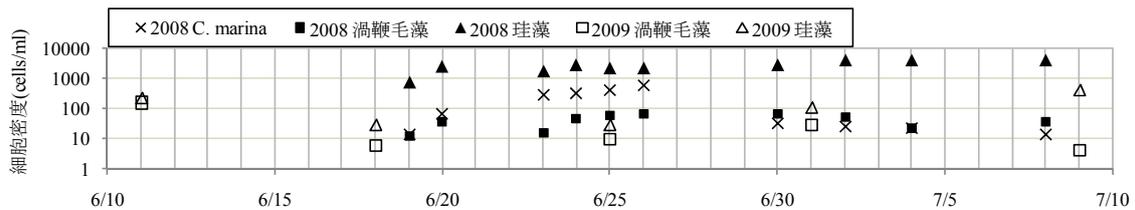


図-10 植物プランクトンの細胞密度の経時変化

1mの値も併記している)。なお、DINもDIPと同様の鉛直分布となることが確認されている。 σ_t の分布を見ると、時間変動が大きいものの、表層近傍を除けば水面下10~15m付近で密度勾配が大きくなっており、この区間に密度躍層が形成されていたと考えられる。次にDIPの鉛直分布を見ると、深さ10mから20mにかけてDIPが急増していることから、栄養塩成層はこの区間に形成されていたと考えられる。つまり、2008年の赤潮形成期間における栄養塩成層は、5~7mよりも深い地点に形成されることから、渡辺(1991)⁵⁾が指摘するメカニズムによって鹿児島湾の*C. marina*赤潮を説明することはできない。また、通常は上記のような栄養塩分布が形成されているが、6月23日においてのみ水面下1mのDIPが大幅に増加していたことが分かる。この時、表層で急激な塩分低下が見られたこと、さらに6月23日 σ_t の分布には鉛直混合の影響が見られないことから、このようなDIPの急増は、鉛直混合ではなく、陸域からの栄養塩供給の増大によってもたらされたと解釈できる。

以上のように、鹿児島湾では栄養塩成層が深く、このため*C. marina*は通常鉛直遊泳によって高濃度の栄養塩を摂取することはできない。また、山口ら(1991)⁶⁾の培養実験から*C. marina*は $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上の光条件でなければ増殖できないことが示されているが、赤潮発生期間の平均的な観測値から推定すると、この光量は10m以浅に出現していると算定された。このことから、2008年の*C. marina*の爆発的な増殖は、6月23日までの河川流量の増大にともなって、光環境が好適な0~10mの栄養塩濃度が増加することによりもたらされたと解釈することができる。なお、2009年6月の観測結果においても2008年と同様に、水面下10~15m付近に密度躍層が形成されていたこと、-10mと-20mの栄養塩濃度に大きな差が生じ

ていたことから、2008年6月(6月23日以外)の観測結果は、鹿児島湾湾奥部の典型的な σ_t と栄養塩の鉛直分布を表していると推察される。

(3) *C. marina*赤潮発生の有無を規定する要因

安達ら(2009)は、塩分・水温、光環境、栄養塩環境のそれぞれが制限因子となる場合の*C. marina*の比増殖速度を算定することにより、2008年の*C. marina*赤潮の発生要因を検討した。しかしながら、2008年の赤潮発生期間には、栄養塩に対する競合相手である珪藻類がむしろ優占していたことから、*C. marina*の比増殖速度のみで赤潮発生の有無を議論できるとは必ずしも言えない。そこで、本研究では*C. marina*が発生しなかった2009年においても安達ら(2009)³⁾と同様の検討を行った。

図-9に塩分・水温が制限因子の場合の*C. marina*の比増殖速度、ならびに栄養塩が制限因子の場合の比増殖速度の経時変化を示す(なお、比増殖速度の算出においてはStn.Aにおける水面下1mの観測値を用いた。具体的な算出方法は安達ら(2009)³⁾を参照のこと)。2009年の水温は、6月初旬には比較的高い値を示していたが、*C. marina*の最適水温である 25°C に到達したのは2008年より遅く7月初旬であった。また、2009年6月の降雨量は2008年に比べて少なく、このため2009年の表層塩分は高い値を維持していた。このような状況を反映して、2009年の塩分・水温を制限因子とする場合の比増殖速度は、2008年に比べて全体的に低い値を示している。しかしながら、7月以降は2008年よりも比較的高い値を維持していた。一方、栄養塩を制限因子とした場合の比増殖速度は、2009年7月1日に最大値0.36を示したが、全体的に低い値を示し、この傾向はその後とも変わらなかった。一方、光環境による比増殖速度は両年ともほぼ同程度であり、日

中には水面下1mで0.8以上の値を示していた。

以上のように、水温・塩分の最適時期に違いが見られるものの、水温・塩分の好適期間であれば、2008年と2009年の水温・塩分に対する比増殖速度の差は小さい。そこで、栄養塩に関する最大の比増殖速度を比べてみると、2008年は0.54、2009年は0.36となることが分かった。このように値に差はあるものの、2008年には栄養塩の比増殖速度が0.16程度でも*C.marina*が増殖していることから、その違いだけで赤潮発生の有無が決定されるとは考えにくい。ただし、2008年と2009年の累積降雨量には大きな差があり（2008年6月：630mm、2009年6月：239mm）、結果として栄養塩の総流量も大きく異なっていたと推察できる。*C.marina*の細胞分裂を1日1回とした場合、1mlの試水中に1細胞が検出されてから100細胞/mlを超えるまでには1週間程度かかることになる。このことを考慮すると、栄養塩の履歴も赤潮発生の有無を規定する重要な要因である可能性が考えられる。

次に、栄養塩の競合相手でもある珪藻類の影響を検討した。2008年と2009年の表層（0mもしくは水面下1m）地点における植物プランクトンの細胞密度の経時変化を図-10に示す。この結果を見ると、栄養塩の比増殖速度が増加した2009年7月1日から7月9日にかけて、珪藻類が約4倍に増殖しており（渦鞭毛藻は5分の1に減少）、栄養塩は増殖速度の大きい珪藻によって優占的に使用されたものと推察される。一方、*C. marina*赤潮が発生した2008年には、栄養塩の比増殖速度が増加した6月23日から30日にかけて珪藻類はほぼ同程度の値で推移していた。2008年の珪藻優占種が比較的細胞の大きい*Hemiaulus sp.*や*Leptocylindrus spp.*であったのに対し、2009年では細胞の小さい*Chaetoceros spp.*や*Nitzschia sp.*であったこと、一般に、細胞の大きさが小さくなるほど珪藻の増殖速度が大きくなることを考慮すると、栄養塩増加時に既に優占している植物プランクトン種が赤潮発生の有無に関係している可能性も十分に考えられる。

4. 結論

本研究により以下のような知見が得られた。

- 1) 鹿児島湾・北湾周辺河川からのシリカ負荷の特性を明らかにした。
- 2) 鹿児島湾湾奥において現地調査を実施し、シリカを必須栄養素とする珪藻とシャトネラ赤潮との競合関係を明らかにした。

参考文献

- 1) 大垣眞一郎（監修）：河川と栄養塩類、技報堂出版、2004.
- 2) 鹿児島県工業技術センター：鹿児島県工業試験場 第17号、1970.
- 3) 安達貴浩ら：鹿児島湾における有害赤潮発生時の水質とプランクトン組成の現地観測、水工学論文集、第53巻、

pp.1507-1512、2009.

- 4) 例えば、小野知足ら：播磨灘西域における *Chattonella antiqua* の高密度発生と水質、気象要因等との関係、日本水産学会誌、Vol.64(4)、pp.665-672、1999.
- 5) 渡辺正孝：赤潮の発生機構Ⅱ播磨灘におけるシャトネラ赤潮の発生機構、月刊海洋、Vol.24、No.1、pp.43-49、1992.
- 6) 山口峰生ら：有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* の増殖速度に及ぼす水温、塩分および光強度の影響、日本水産学会誌、Vol.57(7)、pp.1277-1284、1991.