課題名	Ｄ－０６１　流下栄養塩組成の人為的変化による東アジア縁辺海域の生態系変質の評価研究		
課題代表者名	原島 省（独立行政法人国立環境研究所 水土壌圏環境研究領域 海洋環境研究室）		
研究期間	平成18－20年度	合計予算額	92,332千円（うち20年度 28,019千円） ＊上記の合計予算額には、間接経費20,662千円を含む

研究体制
(1) N、 P、 Si流下比変化による海洋生態系変質の総合解析（独立行政法人国立環境研究所）
(2) 漁業生態系モデルに基づいたN、P、Si組成比の海洋高次生態系への影響評価（独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所）
(3) 年代間データ比較に基づいたN、P、Si組成比の海洋低次生態系への影響評価（広島大学）
<研究協力機関＞水産総合研究センター西海区水産研究所

研究概要
１．はじめに（研究背景等）

近年、東アジア海域では有害赤潮やクラゲが増大するなどの生態系変質が起こっており、これらは世界の半閉鎖的な沿岸・縁辺海域に共通した問題となっている。様々な原因が考えられるが、人間活動の増大に起因して今後の環境政策の余地のある過程についての評価研究が緊急の課題となっている。気候変動問題においては、炭素循環への人為介入の問題が焦点である。一方、水域生態系変質においては、窒素(N)、リン(P)の循環擾乱の問題が焦点である。図１に示したように、長江流域では、人口×消費の増大→施肥・都市排水の増大→河川経由のNおよびPの増大が顕著になっている。さらに、近年になって、増加するダム湖に懸濁粒子 (SS)や溶存ケイ素（DSiあるいはシリカと略称）がトラップされるため、それらの流下量が減少する傾向にあること、そしてこれらの変化が海洋環境に与える影響が懸念されている。

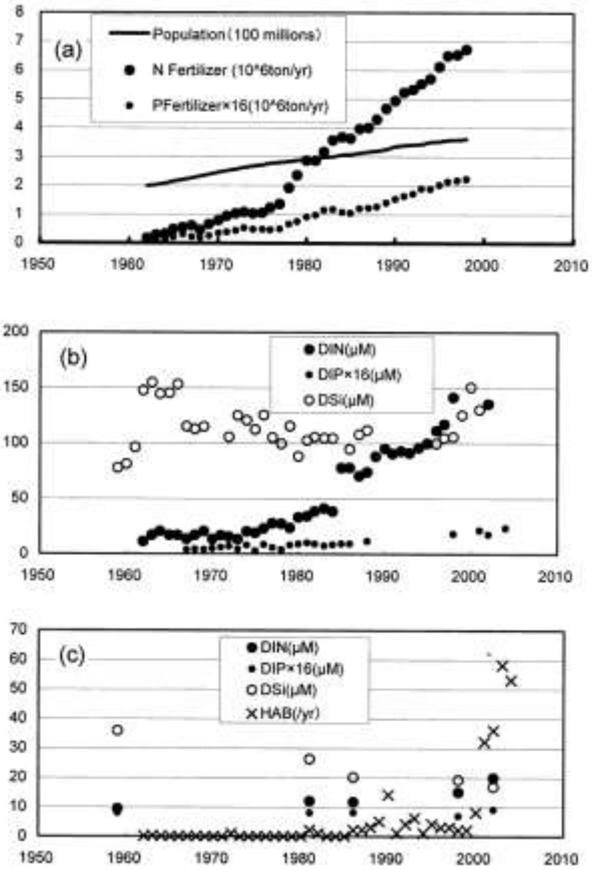

図１．(a) 長江の流域人口、N・P年間施肥量の長期変化(出典：Duan, 2008)、 (b)長江河川水のN、P栄養塩濃度の増大(同上)およびSi栄養塩の減少(Zhang, 2006)、 (c) 長江河口隣接海域のN、P、Si各栄養塩の長期変化と有害赤潮（HAB）発生件数の長期変化（出典：Wang, 2006）。

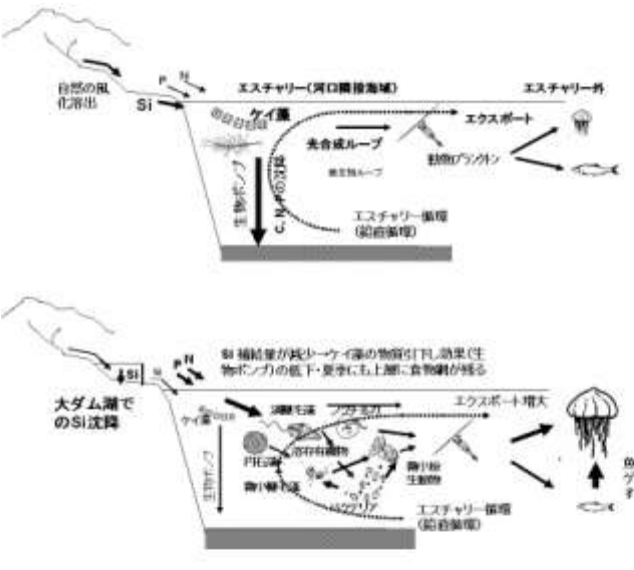

図２．拡大シリカ欠損仮説の模式図
自然循環型(上)、b.人為介入循環型

推測される過程は、沿岸海域での Si/(N,P)比低下が起こり、ケイ藻類（Si を必要とし、正常な海洋生態系の基盤となる）よりも非ケイ藻類（Si を必要とせず、有害赤潮種を含む）の増殖が有利になることである（シリカ欠損仮説）。先例として、ドナウ川中流のアイアンゲートダム建設と黒海の有害植物プランクトンやクラゲの増大が考慮された。長江河口隣接海域においても、図１(c)に示されるように、N、P 栄養塩濃度が上昇する一方 Si は減少し、また有害赤潮の件数が増加したことが報告されている。

本研究課題の先行課題（D-3）では、この仮説に拠ってケイ藻ブルームと非ケイ藻ブルームの発生頻度を評価した。ただし、この中のデータ解析において「シリカ欠損仮説」が一見適用できない事例、すなわち、増殖特性の Si 依存性だけでは説明できない現象も明らかになった。このため、Si が係わる過程についてさらに物理的・生物的に動的な要素を考慮して検証を進める必要がある。また、ダム増加や他の人間活動の増大要因を併せ、クラゲ問題まで拡張した環境問題への適用も視野にいれる必要がある。

２．研究目的

上記のような背景から、本研究課題では「シリカ欠損仮説」に物理的・生物学的に動的な要素を加えた「拡大シリカ欠損仮説」を新たに考え、この仮説にもとづいて因果関係を検証する。すなわち、ケイ藻が、シリカ殻のバラスト作用のために、上層の溶存物質を効率よく下層に引きおろす生物ポンプ機能を果たしているのに対し、非ケイ藻類はその機能が弱い。このため、上層に溶存物質が残留しやすくなり、上層の食物網が肥大し、クラゲなど上位栄養段階の生物の増大に至るという仮説である（図２）。また対象領域が広大であるため実験的手法により検証することがむずかしい。このため、本課題では、モニタリング、モデリング、広汎なレビューの３方面の努力を等分に行いデータ不足を補う。また、主対象水域を、(a)三峡ダムの影響を受ける長江エスチャリー-東シナ海（図３）とするほか、同様にシリカ欠損要因を含む(b)黄河-黄海水系、 (c) 琵琶湖-淀川-瀬戸内海、(d)アイアンゲートダム-ドナウ川-黒海の事象も併せて考慮し、科学的不確実性を順次低減してゆく。(b)については研究の蓄積が多く１つの基準となり、(c)についてはフェリーなどの定期航路利用長期・高頻度モニタリングデータがあり、これがモデルの検証等に不可欠となる。

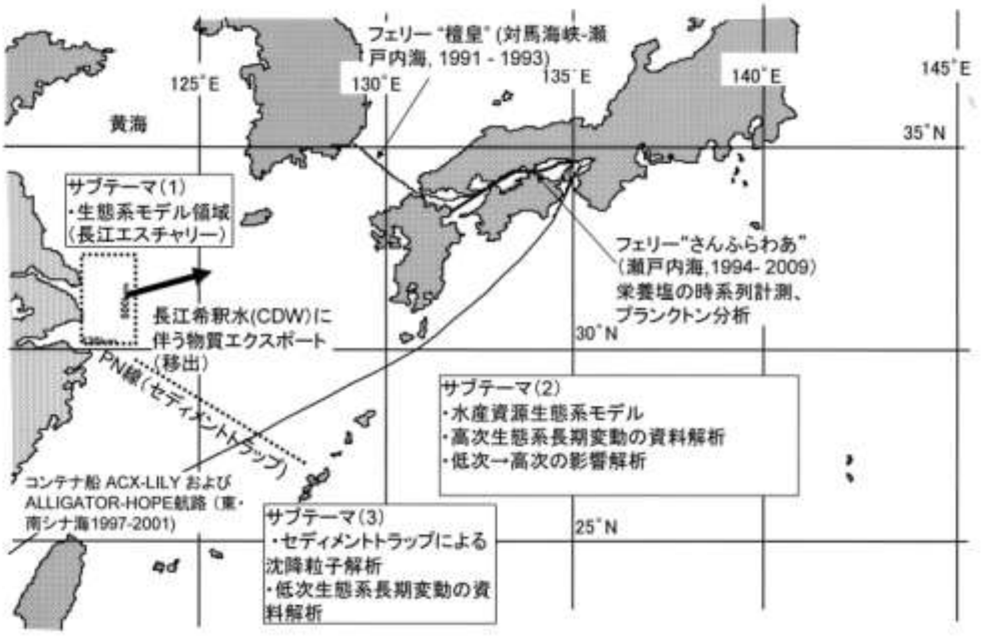

図３．研究対象海域と各サブテーマにおける研究方法の模式図

また、各サブテーマで、次のような分担を行う。 サブテーマ(1)では、陸から海への栄養塩流下過程とシリカ欠損過程全般をレビュー対象とし、瀬戸内海のフェリーによる時系列観測、簡略化された生態系力学のモデル構築を行う。また、サブテーマ(2)および(3)で得られた知見・データも含めた総合解析を行う。サブテーマ(2)では、動物プランクトン以上の高次の海域生態系の過程をレビュー

対象とし、安定同位体によりクラゲの食性を解析するとともに、漁業生態系モデル Ecopath/Ecosim を使って生物現存量データに基づいた生態系フラックスの定量化を行う。(3)では、主に東シナ海の物質循環と、沈降粒子過程のレビューと、セディメントトラップ実験資料の分析に基づいた、沈降生物粒子への河川影響の評価を行う。

これらの結果は課題レベルで集約し、後述の UNEP-NOWPAP/3 などの国際行政機構における専門委員としての議論、ICSU-SCOPE などの国際学術機構によるシンポジウムでの議論・出版という形で環境政策への提言を行う。

３．研究の方法と成果

（１）N、 P、 Si流下比変化による海洋生態系変質の総合解析

上記の問題に対し、フェリーによる長期・高頻度海域モニタリング、長江エスチャリー（河口隣接域）を対象とした鉛直２ボックスの生態系モデル、既存データ解析に基づいて検証する。モデルとフェリーデータの照合の結果、冬季に存在した各栄養塩を使ってケイ藻主体の春季ブルームが起こり、その過程で Si または N が枯渇したときにケイ藻の自律沈降が起きること、人為影響が強い系では N 残留 Si 枯渇の状態になり､夏季に Si を必要としない非ケイ藻類のブルームが起きることが確認された。長江エスチャリーで Si/N 比が低下傾向にあるのに対し、瀬戸内海では 1990 年代には春季ブルーム後に N 残留 Si 枯渇になることが多かったのが、2000 年代にはいってから N 枯渇 Si 残留の状態になることが多くなり、環境回復フェーズにはいっていることが推測される。

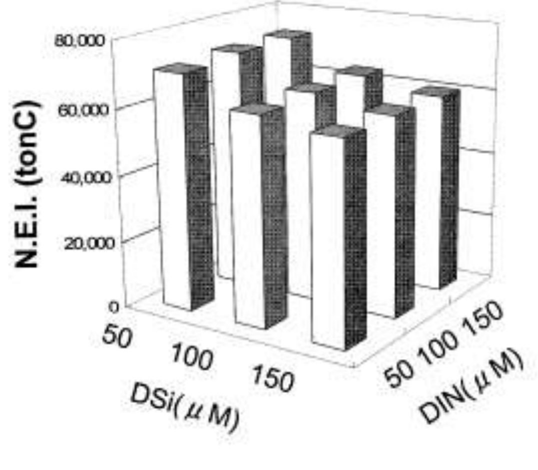

図４．長江エスチャリーからの栄養物質移出指数（縦軸流出する栄養塩、生物粒子､デトライタスの総和から生態系上位生物のバイオマスに転化される量の推定値）。生態系モデルにより、この指数は長江のDINが増大し、DSiが減少するほど増大する、すなわち「クラゲ＋魚」に転化する割合が増大する量が増える。さらに図１中の魚よりクラゲを有利にする要因を考慮すると､クラゲのほうがより増大することが予測される。

エスチャリー上層から流出する栄養塩、有機物、生物粒子の総和が食物網を経て生態系上位生物のバイオマスに転化される量(｢クラゲ＋魚｣の餌となる量)を｢栄養物質移出指数｣（N.E.I.:Nutritions Export Index）として定義した。この指数の流入河川水質パラメータへ依存性を調べると、長江の溶存態無機窒素（DIN）濃度が増加し、DSi 濃度が減少するほど、栄養物質移出指数（N.E.I.）が大きくなった（図４)。ここでの「生態系上位生物」は「クラゲ＋魚」の合算量で定義したので、クラゲのみの増加を示すものではないが、その他の人為的要素（漁獲圧増大、Lo(2008)に指摘されたような海面養殖の増大によるクラゲ幼生付着場所の増加、Xian(2006)に指摘されたようにダムによる海水塩分の平準化・高塩分化）等をあわせて考慮すると、魚よりクラゲが有利になることが推定できる。すなわち､｢拡大シリカ欠損仮説」にかかわる環境変質がベースラインとなり、その他の人為的要因が重ね合わされることにより、クラゲの増加につながることが考察される。

なお、夏季にケイ藻から非ケイ藻類への遷移が起こることには、ケイ藻の自律沈降が鍵になる。すなわち、冬季栄養塩を使ってケイ藻主体の春季大増殖が起こり、Si 枯渇時ケイ藻の沈降が速くなることは、Bienfang ら(1983) の室内実験で予測されていたが、本研究においてフェリーによる栄養塩の高頻度時系列観測、モデル、赤潮記録の解析の併用によりはじめて実海域で検証されたといえる。メカニズム的には、栄養塩枯渇→ケイ藻細胞の生理状況変化→TEP 分泌による細胞相互の凝集→Stokes 沈降速度式における実効粒径の増大→沈降速度の増大と説明される。

（２）漁業生態系モデルに基づいた N、P、Si 組成比の海洋高次生態系への影響評価

既往データを用いて、瀬戸内海（播磨灘）における栄養塩濃度と漁獲量との関係について検討し

たところ、1990年代半ば以降，海水中の溶存態無機窒素（DIN）濃度が減少傾向にあり、それとほぼ同期した形でクロロフィルa濃度や漁獲量も減少傾向を示していた。このことから、1990年代半ば以降の瀬戸内海の一部の海域においては、窒素負荷量の減少に伴うDIN濃度の減少が植物プランクトン現存量の低下、さらには漁業生産の低迷に結びついている（すなわちボトムアップ効果）可能性が示唆された。

トップダウン効果（漁獲圧の増加）とボトムアップ効果（大型植物プランクトンに対する小型植物プランクトンの比率の増加）を示す２つのシナリオを想定し、瀬戸内海（播磨灘）を対象に構築した平衡状態モデル（Ecopathモデル）を基に感度解析を行い、有用魚介類やクラゲ類等のゼラチン質動物プランクトンを含む生物群の現存量に及ぼす影響について検討した。感度解析の結果、漁獲圧の増加は、有用魚介類現存量（資源量）の減少とクラゲ類現存量の増加をもたらした。一方、大型植物プランクトン（珪藻類）に対する小型植物プランクトン（鞭毛藻類）の比率を増加させたところ、漁獲圧の増加に対する応答と同様に、有用魚介類現存量が減少し、クラゲ類現存量が増加する結果となった（ただし、変化量は漁獲圧の増加に比べ小さい）。以上の結果から、漁獲圧の増加（トップダウン効果）のみならず、栄養塩動態（組成比）の変化に起因する餌料環境の変化（ボトムアップ効果）も魚介類、クラゲ類等の高次生物を含む海洋生態系を変質（劣化）させる可能性があることが確認された。

（３）年代間データ比較に基づいたN、P、Si組成比の海洋低次生態系への影響評価

海域への流入栄養塩組成・フラックスの変化が、植物プランクトン粒子組成・沈降フラックスを変化させるという「拡大シリカ欠損仮説」の検証を、主にセディメントトラップで捕捉された沈降粒子の解析から行った。1990年代前半のMASFLEXプロジェクト（東シナ海陸棚上および同縁辺の沖縄舟状海盆）と1998年の長江河口域における残存サンプル中の化学成分と植物プランクトン組成の解析、また2007年の東シナ海航海における底層水中の植物プランクトンの解析、および既存資料のレビューを行った。その結果、1993年の沖縄トラフにおけるケイ藻類の沈降フラックスは、粒子の主要化学成分フラックスとよく相関があり、大深度ほど大きく、中・底層の沈降粒子の一部に内部陸棚域に卓越する底生性ケイ藻の*Paralia sulcata*が出現していた。また、1995年春季の陸棚底層では、全ケイ藻およびP. sulcataの沈降フラックスは陸棚の中央から縁辺部にゆくほど顕著に小さくなっていたが、全ケイ藻中に占めるP. sulcataの割合は緩やかな減少を示した。一方、渦鞭毛藻のフラックスは内部陸棚と陸棚中央部でほぼ同量で、陸棚中央部ではProrocentrum minimumが全渦鞭毛藻の半分近くを占めていた。なお、内部陸棚と陸棚中央部の渦鞭毛藻フラックスは、ケイ藻フラックスの各々1%以下、11%程度であり、陸棚縁辺部では皆無であった。1990年代後半に相当する1998年5月における長江河口域の植物プランクトンのフラックスでは、渦鞭毛藻の*P. dentatum*が優占していた。また、2007年6月における底層水中では、内部陸棚から陸棚縁辺部にかけて、ケイ藻は1/5程度に減少したが、P. sulcataには顕著な減少は見られず、ケイ藻中ではP. sulcataが優占していた。また、内部陸棚でP. donghaienseが優占する海域があった。これらのことから、内部陸棚から海底に沿って陸棚斜面へと流出する*Paralia sulcata*輸送機構の存在が明らかとなり、1990年代後半から、内部陸棚と陸棚中央部に至る海域において、植物プランクトンの種組成に変化（生態系の変質）が生じている可能性が示唆された。

４．考察

本課題の研究結果に基づいて推測されるのが、東アジア海域に起こりつつある以下のようなシナリオである。

長江では、20世紀後半に施肥や都市排水のためにN、P栄養塩の濃度が増大する反面、DSi濃度は2/3程度に減った(図１(a)）。この原因につき、Wang (2006)は、三峡ダム以前も含めたダムの累積の影響を指摘してしている。一方、Zhang (2006) は、降雨量の変動や森林伐採の影響（裸地が増えるとDSi溶出は増える）も影響するので、ダム影響の抽出は簡単ではないという慎重な判断をしている。N:P:Si相対比への影響以上に、今後の「南水北調整」で長江水量が華北に向けられることを考えると、DSi流下絶対量が減ることは想像に難くない。

サブテーマ(1)の生態系モデルからは、このようなDIN増加、DSi減少は、長江エスチャリーから流出する栄養物質を増加させるとの結果が得られた。すなわち、生態系上位に位置する肉食生物（クラゲ＋魚）の食物となることによってそれらのバイオマスの増加につながる可能性がある。このメカニズムとしては以下になる。冬季にはN、Si栄養塩がともに潤沢で、ケイ藻は春季ブルーム（大増殖）を起こし、その際にシリカ殻のバラスト作用のために粒状態有機炭素（POC）を下層に引き下ろ

す。ところが、Siの流入が長期的に減ってゆくと、この冬季の栄養塩中のSi相対比が少なくなる。そうすると､春季ブルーム終了時にSiが枯渇してケイ藻が減退するために栄養物質の引き下ろし機能も減退する。この結果、上層に残った栄養物質が、エスチャリー循環に乗って流出する量が増えることになる。すなわち本課題の目的である「拡大シリカ欠損仮説」が、少なくともモデルの上で定性的には検証できたことになる（図５中で１点鎖線の円内部分）。

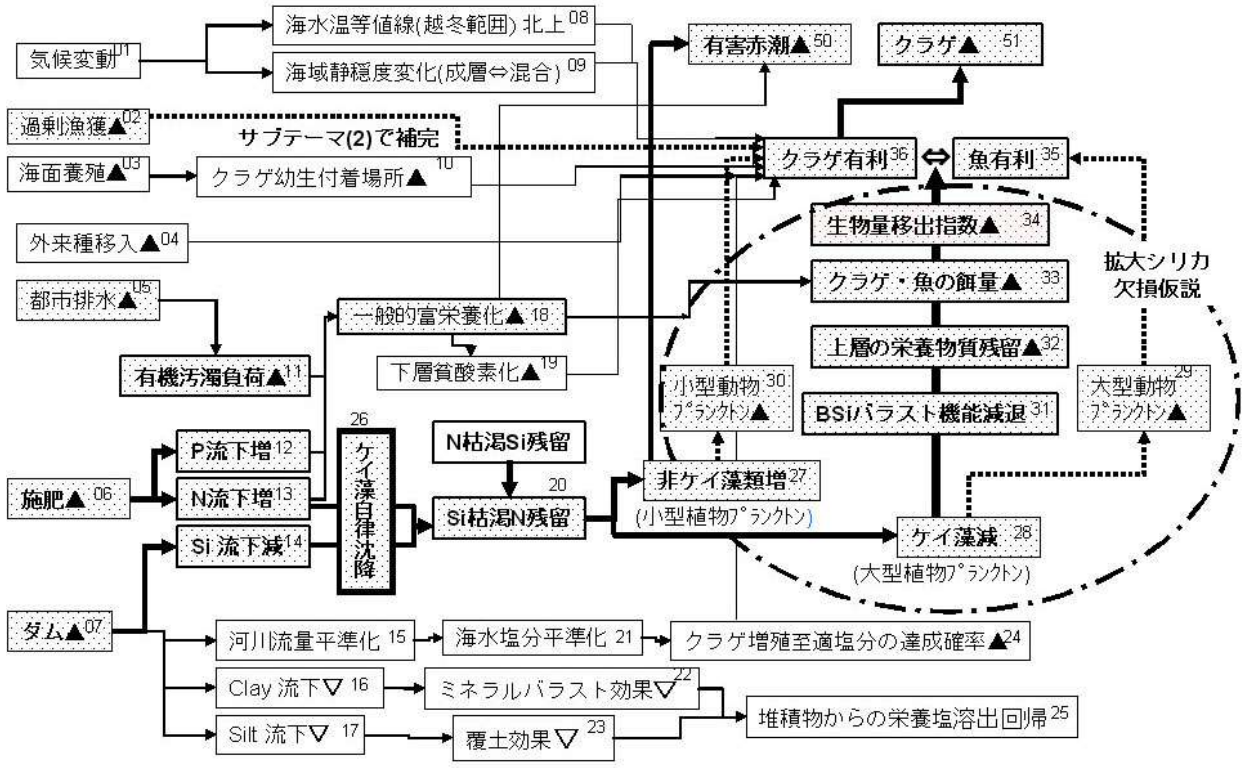

図５.人為影響要因（左側縦列）から有害赤潮やクラゲの増加などの海洋環境変質（右上）の間の推定因果関係。本研究課題では、これらのうち薄墨色部分のフローについて観測、既存データ解析、モデルに基づいた検証を行う。それら以外についても広汎なレビューをおこない、包括的な検証に努める。各項目中の記号▲、▽はそれぞれ増大、減衰のトレンドを示し、各事象の番号nnおよび事象間因果の番号nn-mmについては、本文中の引用に使う。

ここで推定できたのは、肉食生物（魚＋クラゲ）が増えるだろうということで、クラゲのみの増加については言及できない。ただし、図５中で、過剰漁獲（事象02)、海面養殖面の増加でクラゲのポリプ幼生期の付着場所が増えた（事象03）、貧酸素化にはクラゲのほうが耐性がある（事象19）、ダムで流下水量が平準化・減少したため、沿岸海域の塩分が安定・高塩分化した（事象21）、小型動物プランクトンの増加（微生物ループの卓越、事象17および30）など、魚よりもクラゲを有利にする事象を考慮すると、増加した「栄養物質移出」が魚よりもクラゲに転化されることが考えられる。

このようなシナリオについては不確実性も存在する。図１(b)および(c)では、長江および同エスチャリーにおけるDSiおよびDIN濃度は現在ほぼ同等であり、はっきりとしたSi制限になるとはいえないかもしれない。これに対しては、フェリー観測結果から、ブルーム時のケイ藻がDSiをDINの２倍程度まで吸収することがあり、このためSi枯渇の可能性が否定できないといえるだろう。また、Siの供給量がNより多くても、堆積物からのSiの再溶出はNのそれに比べて小さいことから、やはりSi制限になることが否定できない。

また、通常時でケイ藻が非ケイ藻類よりも沈降率が大きいことのほかに、Si枯渇時にケイ藻の「自律沈降」が起こるらしいことが、観測結果とモデル結果から明らかになった。この現象は、Bienfang (1982)の室内実験で指摘されていたが､本研究になってはじめて現場観測データに基づいて検証できたといえる。最近になって、Kerr(2008)はメゾコズム実験によって、ケイ藻が（栄養塩枯渇等の）環境ストレスを感知するとTEPを分泌して細胞同士が凝集し、（ストークスの沈降速度を大きくして）

沈降を顕著にするという説を出しており、このことも「自律沈降」という考え方に整合する。また、Richardsonは、DINの枯渇もケイ藻沈降を加速させるとの実験結果を提出している。この場合にもケイ藻は希薄になるが、N枯渇の場合にはすなわち人為影響の少なかった過去の状態にあたるので（ノリの色落ちを除き）環境上の問題は少ないといえよう。

なお、動物プランクトンの捕食もケイ藻の希薄化に寄与すると考えられるが、自律沈降と同じく、ケイ藻をより顕著に引き落とす方向に働く。すなわち、ケイ藻からなる糞粒が硬くしまって沈降しやすいのに対し、非ケイ藻類からなる糞粒はばらけやすく、完全に沈降する前に分解されやすい（Turner, 1994）。すなわち、捕食も「拡大シリカ欠損仮説」を裏づける方向に働く。サブテーマ(3)で用いたセディメントトラップ捕捉粒子中には動物プランクトンの糞粒がみられたものの、植物プランクトン自体の量がかなり多いため、ケイ藻ブルームの終了には捕食よりもケイ藻自身の「自律沈降」の寄与が大きいことを裏づける。

ケイ藻の自律沈降なくしては説明できない端的な事実として、瀬戸内海の播磨灘で、夏季にDSi濃度が回復してDSi/DIN比が高い状態でもケイ藻は増殖せず、むしろ非ケイ藻赤潮が起こりやすいことがあげられる。対照的に陸起源のN、P、Siが連続的に補給される大阪湾では、DSi/DIN比は低いが、ケイ藻ブルームが支配的である。これらの事柄は、単純な「シリカ欠損仮説」では説明できないが、ケイ藻沈降を考慮した「拡大シリカ欠損仮説」とは整合する。

また植物プランクトン細胞の沈降に関しては、生物粒子に無機懸濁粒子が付着することによって沈降が促進される効果（ミネラルバラスト効果）も存在する。この効果をモデル上で評価したところ、ケイ藻については自律沈降率に比べて相対的に小さかった。対照的に非ケイ藻類はもともと沈降率が小さいため、SS付着の効果が有意である。このことは、渦鞭毛藻赤潮が起こった海域での粘土鉱物散布がすでに「赤潮駆除剤」として実用化されていることと整合する。したがって、ダム増加は、DSiをトラップするほか、無機懸濁粒子をトラップすることでケイ藻よりも非ケイ藻類に有利にはたらくといってよいだろう（事象22）。

海域の現場において、「ケイ藻の自律沈降」が検証されてこなかったのは、季節変化と長期的トレンドを表示できる高頻度時系列なデータが存在しなかったことによる。その意味で、本課題のフェリー観測の効果が大きかったといえる。また、フェリーによる観測により、1990年代には春季大増殖後にDSiが枯渇していたのが、近年はDSiは枯渇せず、むしろDINや溶存無機態リン（DIP）が枯渇するようになり、DSiは回復傾向にあることが確認されている。これに対して長江河口については、今後シリカ欠損過程が進行すると考えられ、この点から同海域においてフェリー観測を行う必要があるだろう。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

1)従来の海洋環境問題の議論で、NとPが中心であったのに対して、新たに「拡大シリカ欠損仮説」を提起してSiの重要性を検証した。特に、DSi枯渇時にケイ藻の自律沈降が起こることを海域データの上から検証し、上記仮説を裏づけた。
2) 長江のDSi濃度が低下し、DIN濃度が上昇するほど栄養物質のエスチャリー外への流出が増え、これがクラゲ増加につながることをモデル上で予測した。
3) フェリー観測データによって、栄養塩環境が植物プランクトン増殖を支配するだけではなく、逆にケイ藻動態（Si枯渇時の自律沈降等）が栄養塩環境を支配してことを明らかにした。
4) 播磨灘のDSi-DIN相関から、ケイ藻が従来のレッドフィールド比よりも２倍ほどの対N比でSiを吸収すること、すなわち初期にDSiがDINより潤沢でｍDSiが枯渇する可能性があることが示された。また、1990年代には、ブルーム終了時にNが残留していたが2000年代後半にはSiが残留するようになった。すなわち、瀬戸内海は環境回復傾向にあると推定される。
5) クラゲ問題について、従来はトップダウン制御の要素が中心に議論されていたが、サブテーマ(3)でボトムアップ制御（栄養塩環境等の要因の影響）も重要であることが確認できた。
6) クラゲ増加などの環境変質は、N、P、S組成変化だけで説明できるものではないが、このベースライン上に他の複数要因が重なったことによるものであると推定できた。

（２）地球環境政策への貢献

地球規模のN,P負荷増大とダム増加よるSi流下減少に一定のチェックを行うべきであるということがとりまとめられた。またこれらの考えを以下のような形で国外的にも表明できた。

1) 本課題代表者は、UNEP-NOWPAP/3-WG2（国連環境計画-北西太平洋地域海行動計画/共同モニタリング-第２作業グループ「河川経由および直接負荷による海洋汚染」）の専門委員として資料提供、議論、フォローアップ作業に加わった。H18年度に作成された国別報告書およびNOWPAP地域概括報告書に続き、統合環境評価報告書にシリカ欠損過程の記載を含めた。
2) 本課題代表者は、ICSU-SCOPE（国際学術連合－環境問題特別委員会）が2007年4月に主催した「閉鎖性海域への栄養塩・懸濁粒子流入に関するワークショップ」のグループ討論に参加し、その報告が科学的な環境政策への提言のための単行本として出版された。
3) 世界的なクラゲ増加問題を報じた米科学財団（NSF）2008年12月12日付のプレスリリース（http://www.checkout.org.cn/news/special_reports/jellyfish/swarm_chart.pdf）で、当課題の仮説が「科学者は、揚子江のダムが栄養塩や淡水の流下を減らし、このためにクラゲが増えて日本海に流入したと考えている」と無記名ながら紹介された。
4) Science誌（2008年12年12日付）が欧州フェリーボックス計画（2000～）を紹介するかたわら、「日本や韓国を含む海域でも同様の観測が実効性を示している」旨報じた。先行して1991年に開始した当方のフェリー観測の海洋環境管理上の有効性と先見性が認められた。
5) サブテーマ(3)の成果の一部は、2008年度に開催されたEMECS 8 International Conference（第８回世界閉鎖性海域環境保全会議）で報告された。

６．研究者略歴

課題代表者：原島　省

1950 年生まれ、京都大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、国立環境研究所水土壌圏環境研究領域海洋環境研究室長

主要参画研究者

（１）：原島　省（同上）

（２）樽谷 賢治

1964 年生まれ、広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程修了、学術博士、
現在、水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所生産環境部
環境動態研究室長

（３）井関 和夫

1949 年生まれ、東北大学大学院農学研究科博士課程修了、農学博士、現在、広島大学大学院生物圏科学研究科 教授

７．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

1) A. Harashima: J. Environmental Science for Sustainable Society, 1, 33-38 (2007)
"Evaluating the effects of change in input ratio of N: P: Si to coastal marine ecosystem"
2) 原島省、井関和夫、樽谷賢治: 海洋気象学会誌「海と空」, 82, 61-71 (2007)
「流入栄養塩比の変化による内湾・陸棚域の生態系変質の可能性」
3) 小林志保、藤原建紀、原島省: 沿岸海洋研究, 44, 165-175 (2007)
「瀬戸内海における溶存態無機窒素の季節・経年変動とその要因」
4) 浅野和仁、高橋 理, 石原靖文、原島 省：海洋理工学会論文集, 55-58 (2008)
"システムダイナミクスツールによる海洋生態系モデルの構築"
5) 原島 省：環境バイオテクノロジー学会誌, 8, 9-15 (2008)
"海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割"
6) Kroeze C., Middelburg J., Leemans R., Escobar-Briones E., Fennel W., Glaser M., Harashima A., Liu K.-K., Meybeck M., in Urban E. R., Jr.et al. (eds.), Watersheds, Bays, and Bounded Seas -The Science and Management of Semi-Enclosed Marine Systems, Chapter 5, 77-96
"Integrating Tools to Assess Changes in Semi-Enclosed Marine Systems"
7) Jens Hartmann, Nils Jansen, Hans Dürr, Akira Harashima, Kenji Okubo, Stephan Kempe, Predicting riverine dissolved silica fluxes into coastal zones from a hyperactive region and analysis of their first-order controls, Int J Earth Sci, DOI 10.1007/s00531-008-0381-5 (2009)
8) 小林志保、藤原 建紀、原島省：沿岸海洋研究 46, 79-85 (2009)
"瀬戸内海における溶存無機態リン・ケイ素の季節・経年変動"