

海底の堆積物に記録される自然・人為の環境変化

兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 准教授
廣 瀬 孝 太 郎

1. 複雑な沿岸の環境システムと「あるべき姿」

沿岸域の水圏環境は、塩分、栄養塩量、水温などの非生物的(abiotic)な要素とプランクトンや魚類など有機的(biotic)な環境要素により構成される。水質は植物プランクトンをはじめとした基礎生産者の生育を左右し、基礎生産者の挙動は、それらを餌とする動物プランクトンや魚類など上位の生態系に波及する。ただしこれらの関係は、状況によって正負に切り替わり影響し合う動的な複雑系である。ゆえに、ある変化が水圏のシステム全体に及ぶ影響を予想するためには、多岐にわたる情報を必要とする。

瀬戸内海をはじめとする日本の都市沿岸域の姿は、国内の近代化により大きく変化したと言われる。とくに第二次世界大戦後の高度経済成長期(1955～1973年)における人為的な環境改変は非常に激しく、栄養塩の過剰供給や埋め立てによる藻場・干潟の消失、海水交換の悪化などにより、水質や底質は壊滅的に悪化したと考えられる。その後、1970年代以降の一連の環境施策により、CODや窒素・リンなどの栄養塩量は全体としては減少し、環境は回復の途上にあるとされる。しかし状況は海域によって異り、近年では海藻の発育不良や魚類の漁獲量の減少など、過去には記録のない状況も報告される。さらに、気候変動など系外からの影響も懸念されている。水圏環境の「あるべき海の姿」は、漁業や景観、防災など、それぞれに携わる人の視点によって異なることがあり、それらが同時に成立しないケースもあるかもしれない。「豊かな海」のより具体的な状態については、今後も多様な視点から議論が必要だろう。

2. 海底の堆積物に記録された過去の記録

「あるべき姿」を導き出すためには、「過去の状態」が有効な手引きの一つである。人為的な環境改変が顕在化する前の時代に遡って環境変化を長い時間軸で捉えることができれば、現在の状態をその中に位置づけることができる。過去の環境を時間軸で捉えるには、いくつかの方法がある。一つは観測記録(モニタリングデータ)の蓄積である。瀬戸内海では、継続的な環境の観測が行われてきた^{1), 2)}。ただし、体系的な観測が開始された1970年代は、既に環境問題が深刻化していた時代である。それ以前の環境、つまり人為的な環境改変・汚染の顕在化や急激に進行したプロセスに相当する期間の記録は、断片的にしか手に入れることができない。

観測記録よりはるか前の時代に遡ることができる情報もある。それは、海底に継続的に積み重なった泥質堆積物(泥)の中に含まれる。代表的なものが、当時に生きていた小さな生物の殻や骨格などで、微化石と呼ばれる。微化石の形態や材質は多様である。節足動物の一種である貝形虫や一次消費者である有孔虫は炭酸カルシウムの殻を持つ。基礎生産者である珪藻の細胞壁や珪質鞭毛藻の内骨格はシリカガラスでできている。渦鞭毛藻の休眠孢子など、有機質の殻や膜を持つものもある。これらはそれぞれ起源となった生物の死後にも分解されにくく、堆積物の中に保存される。微化石からは過去の生物群集が明らかになるとともに、各分類群の好適な塩分や水深など生態情報を参照することで、生息当時の環境が推定できる。堆積物には、微化石以外にも物性や化学組成など過去の環境についての情報が豊富に含まれ、それらを統合的に検討することでより具体的な過去の姿が明らかになる。

3. 地質学的な年代尺度からみた大阪湾の環境変化

前述のように、堆積物中の微化石や化学組成から、人為的環境改変の顕在化以前に遡ることができる。しかし、水圏の環境には、内的な要素である水質や生態系以外に、気候変動など外的な要素も大きく影響する。現在の地球は、ミランコビッチ・サイクルと呼ばれる 10 万年前後の周期で寒い時期(氷期)と暖かい時期(間氷期)を繰り返している。この周期でいえば約 1 万年前から現在は間氷期にあたる。一つ前の間氷期は 10～12 万年前であった。10 万年前以降、地球は寒冷化して氷期を迎えた。氷期には氷床(大陸上の厚い氷河)がより発達して海水が減少するため、海面は低くなる。2 万年前の海面は、現在より 120 m 以上低かった³⁾。大阪湾の水深は平均で 30 m 程度であり、明石海峡や紀淡海峡の一部を除けば、現在の大阪湾は当時、ほとんど陸地だったことになる。その後、温暖化に伴い海水準は現上昇し、約 1 万年前に大阪湾と播磨が繋がり明石海峡が成立した。6500-5000 年ほど前に現在より 1-2 m 高くまで海面が上昇した。集水域から運ばれてきた土砂が沿岸部に堆積して平野となり、そこに住み着いた人々が都市を形成して現在に至る。ただし、現在までの気候の変化は遷移的なものではなく、そこには最終氷期のダンスガード・オシュガーサイクル⁴⁾や、完新世の 8.2 ka、4.2 ka イベントと呼ばれる数百年から数千年スケールの短い激しい気候変動が含まれる⁵⁾。昨今の人為的な気候改変がこのような変動を駆動した気候システムと組み合わせられることで、さらに強度の高い変動が起こることも懸念されている。以上のことから、環境に対する取り組みには、長期間の変化とそのメカニズムを明らかにし、現在の状態を評価する必要がある。

4. 堆積物のリザーバーとしての大阪湾

瀬戸内海の東部に位置する大阪湾は、集水域に京都や大阪、神戸など古くから発展した都市域が存在し、人為的環境改変の影響が集積されてきた。そのプロセスは、前述の気候や古地理など自然の環境変化と共に、堆積物を記録媒体として海底に蓄積されている。これは「近畿三角帯」⁶⁾の一部として大阪堆積盆(現在の大阪湾を中心部とする大阪平野)が沈降し続け、底が深くなり続ける受け皿(リザーバー)として堆積物を溜め続けてきたからである。

大阪湾が沈降し始めた時期は、現生人類の誕生よりはるかに古いく、およそ 300 万年前と考えられる。フィリピン海プレートの運動方向が北向きから北西に変化したことで、西日本では中央構造線が弱線となる右横ずれの力が加わった⁷⁾。これにより、六甲、生駒、比良、鈴鹿などの山地ができ、逆に沈降した地域が大阪湾、河内平野、奈良盆地となった。現在の大阪湾の地域が海として成立したのは、125 万年前である⁸⁾。大阪湾はその後、前述の氷期-間氷期サイクルに同調して陸域と海域の環境を繰り返してきた。例えば、110 万年ほど前、初期の大阪湾の沿岸部に溜まったと考えられる泥(Ma1 海成粘土層)が、現在の沿岸部で掘削されたコア(GS-K1 コア)では地下の深度 600m 近くに分布する^{9),10)}。我々は、その長大な記録(110 万年分で 600 m)を読み解くことで、大阪湾が経てきた様々なシステムや強度の環境変化を知ることができる。さらにこれらの変化の変化を解析することで、不明な点が多い水圏のシステムが具体的に浮かび上がってくる。

5. 堆積物から明らかになる近過去の環境変化

現在の大阪湾海底表層部は、上記の連続的な堆積物の最上位に相当する。海底から 1m 程度を掘削し、微化石群集や化学組成を分析することで、過去 100～200 年間程度の記録が得られる。

貝形虫は、1900 年代の沿岸部における多くの種が減少し始め、1960 年代以降に激減した(湾央部では増加)¹¹⁾。有孔虫は、1900 年代に一部の貧酸素に耐性のある種が増加し始め、1960-70 年代にそれらの種が非常に卓越し、同時に種多様度が低下した¹²⁾。1980 年代以降は、種多様度は回復傾向にある。これ

らの変化は、産業活動の指標となる堆積物中の重金属濃度 (Zn、Cu、Pb) の増減¹¹⁾ともよく一致する。すなわち堆積物からみた大阪湾における近過去の動物相は、沿岸部の近代化に伴い変化の兆候を示し、高度経済成長期に激変したことが分かる。

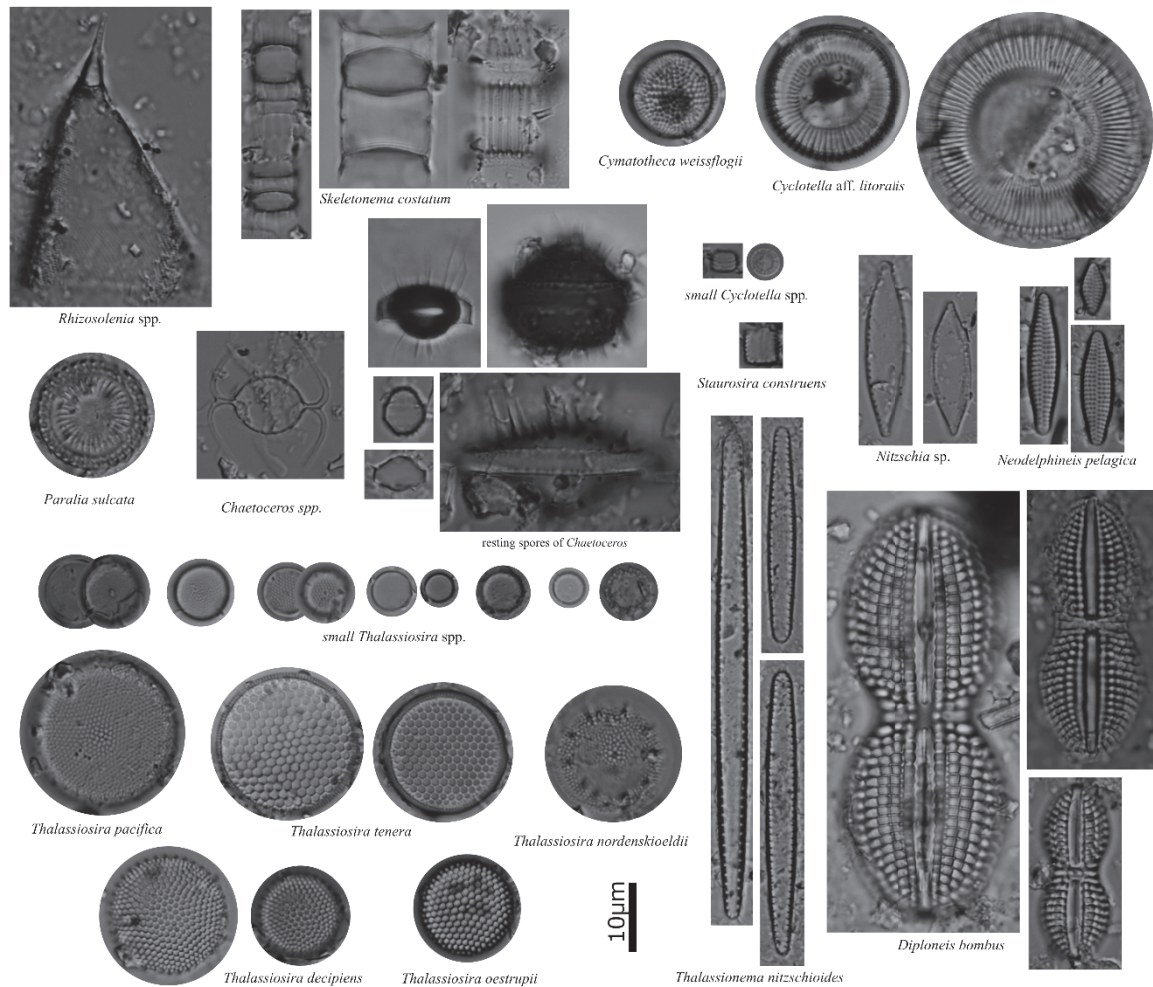


図1 大阪湾および播磨灘の底質から産出する珪藻分類群の光学顕微鏡写真。

基礎生産者の主要分類群である珪藻(図1)も、1960年代に最も大きく変化した¹³⁾。Diploneis bombus などの付着性種の多くが減少し、10 µm 以下の Thalassiosira 属、Neodelphineis pelagica、Chaetoceros 属の休眠孢子など比較的小型の浮遊性種が増加した。変化の特徴の1つは、これらが優占する類似の群集が、人為的環境改変以前の堆積物¹⁴⁾からは確認できないことである。これは、近過去の人為的環境改変による生態系の変化が、少なくとも大阪湾ができて以来100万年以上の間に大きな気候変動を伴いつつも、一度も経験していない特異的なものであることを意味する。2つめの特徴は、1960年代に増加した多くの分類群が、1980年代の環境負荷の軽減以降も優占し続けていることである。2022年秋の調査でも、堆積物表層(過去1年間程度で堆積したと考えられる)からは依然として上記の分類群が多産するとともに、海水試料(ネットプランクトン)では Coscinodiscus granii が優占する、これまでの報告では見られない群集が形成されている水域があった¹⁵⁾。このような時系列変化は、栄養塩量など一部の環境要素の回復のみでは生態系が元の状態に戻るわけではないことを示唆する。

6. 今後の課題と展望

水圏には、ここまで紹介したような骨格や殻を持たず、微化石としては産出しない分類群もある。近年は、堆積物に含まれる有機分子(バイオマーカー)や環境 DNA から、その起源となった生物を明らかにする技術の発展がめざましい。そのため、これまでは知ることが難しかった生物種も含めた生態系変動の全体像に迫ることができるようになりつつある¹⁶⁾。また、微化石についても、高解像度 Micro-X 線 CT や FIB-SEM での殻の立体構造を解析することができるようになったことで、これまで主な解析対象であった群集組成に加え、殻の構造や体積といったような個体ごとの形態情報にも注目して環境負荷を評価する試みがなされている¹⁷⁾。現場における観測については、体系的な体制で観測が開始されて以来 50 年に及ぶ精力的な記録により、変化のトレンドがより明瞭に把握できるようになってきた。加えて、衛星画像を用いて藻場や赤潮をモニタリングする、いわゆるリモートセンシングの技術も日進月歩である¹⁸⁾。さらに、一部の元素や栄養塩に関しては、過去の使用量や集水域の地理情報を組み合わせた空間データセットから、数理モデルに基づいた過去の負荷量の推定も試みられている¹⁹⁾。水圏のシステムは前述したように非常に複雑であるため、これらの新しい技術を結集してその全容を理解することに挑み、沿岸域のあるべき姿を見いだすことが期待される。

7. おわりに

本論は、著者が助成を受けた令和4年度 大阪湾圏域の海域環境再生・創造に関する研究助成制度における研究を通じて得た知見や成果の一部に基づく。研究の実施に際しご尽力頂いた事務局や調査にご協力頂いた方々、共同研究者に深く御礼申し上げます。

引用

- 1) 大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センター(2023)令和4年度事業資料集, 177p.
- 2) 兵庫県立農林水産技術総合センター(2023)2022 年度年報, 103p.
- 3) 前田保夫(2013)第四紀研究, 52, 53-58.
- 4) Dansgaard W. (1993) Nature, 364, 218-220.
- 5) 平林 頌子・横山 祐典(2020)第四紀研究, 59, 129-157.
- 6) Huzita K (1962) Journal of Geosciences (Osaka City University), 6, 103-144.
- 7) Takahashi M. (2017) Bulletin of the Geological Survey of Japan, 68, 155-161.
- 8) 増田富士夫(2022)瀬戸内海, 13-18.
- 9) 三田村宗樹ほか(1998)大阪市立自然史博物館研究報告, 52, 1-20.
- 10) Kitaba I. et al. (2013) PNAS, 110, 1215-1220.
- 11) Yasuhara M. et al. (2007) Limnology and Oceanography, 52, 1633-1644.
- 12) Tsujimoto A. et al. (2008) Marine Micropaleontology, 69, 225-239.
- 13) 廣瀬孝太郎ほか(2008)第四紀研究, 47, 287-296.
- 14) Maegakiuchi K. et al. (2016) Journal of Quaternary Science, 31, 809-822.
- 15) 廣瀬孝太郎(2023)令和4年度 大阪湾圏域の海域環境再生・創造に関する研究助成制度 研究報告書. 10p.
- 16) Nakamura Y. et al. (2022) Scientific Reports, 13, 21642.
- 17) Choquel C. et al. (2023) Frontiers in Earth Science, 11, 422.
- 18) 小林志保(2018)瀬戸内海, 76, 54-56.
- 19) Wang K. et al. (2022) Science of The Total Environment, 843, 156833.