

海の豊かさを支える小さな力持ち

高橋一生*

〔キーワード〕：海洋生態系, プランクトン, 生物生産, 物質循環, 気候調節

1. はじめに

海は地球表面の70%以上を占める。平均の深さは約3800m, ここに地球上の水の97%以上が存在する。近年の研究の進展により、月や火星、その他の惑星において水の存在が報告されているが、液体の水がこれだけ大量に存在している環境は地球において他にはない。まさしく地球は水の惑星と呼ばれるにふさわしく、それは海が存在していることに他ならない。とくに国土の四方を海に囲まれた日本に住む私たちにとって、海は身近な存在であり、古来より水産物供給、国内外との交易の場として私たちの生活を支えてきた。また、近代以降はレジャーや旅行先などに代表される観光資源としての人気益々高まっている。このような経済活動の場としての海は私たちの暮らしにおいて欠かすことのできない要素であることは誰もが理解するところであろう。一方、経済的な価値を生み出さない海の役割についてどの程度理解されているだろうか。海は気候調節、水や物質の循環を司る地球システムの一部であり、私たちの生存に欠かせない生態系である。そして、この海からうける恩恵を考える上で、海に漂いながら生きるプランクトンと呼ばれる生物群の存在が不可欠なのである。本稿では、私たちの生存における海の重要性、さらにその中でプランクトンが果たしている役割について紹介したい。

2. 「漂いながら生きる」

水圏を生息域とする生き物はその生活形態により、ネクトン（遊泳生物）、プランクトン（浮遊生物）、ベントス（底生生物）に大別される。このうちネクトンは、魚類やクジラ・イルカなどの海棲ほ乳類、イカ類など海流の流れに逆らって自由に遊泳する能力をもつ生物群、ベントスはウニ、サザエ、

カニ、ワカメなどに代表されるように海底基質を主な生活空間としている生物群である。そしてプランクトンは水中を漂いながら生活する生物群を指す。水中を生活圏とする点は、ネクトンと共通しているが、その遊泳能力はとて小さく、分布域が海流に支配される点が大きく異なる。これらの区分はもちろん便宜的なものであり、中間的な性質をもつものや、成長に伴って生活形態をかえていくものなどもある。しかしながら、この区分は海食物連鎖や生態系の構成を理解する上で大変都合が良い。端的に言えば、私たちが水産物として利用している種のほとんどがネクトンかベントスであり、その生産を支えているのがプランクトンであると言える。では、プランクトンとはどのような生物群なのであろうか？このことを理解するために、まず彼らが進化してきた環境、すなわち海環境がどのような特徴をもつのかを考えてみよう。

海は広く深く水に満たされた環境である。その特徴は、陸上を生活圏とする私たちの周りをつつむ空気と水の性質を比較すると分かり易い。水は空気に比べて、吸光度、密度、粘性が桁違いに高い。生態系の基盤となる基礎生産者にとって吸光度が高いことは、光合成が可能な生息域がごく浅い層に限られることを意味している。海洋では光合成に必要な光量は透明度の高い亜熱帯外洋域でも最大で深度150~200m程度までしか届かない。平均水深約3800mの海洋では、そのほとんどの場所で海底まで光が届かないことになる。このため海洋では光合成生物が生き残るためには表層に留まり続けることが必須条件となる。一方、海洋の表層では植物の生長に不可欠な窒素、リン、ケイ素などの栄養塩が枯渇しやすい。これは水が空気に比べて比熱容量、粘性、密度が高いことに起因している。貯熱効果が高い海水の表面は太陽放射によって暖められ密度が軽くなるため、密度の高い下層の水と混ざりづらくなる、つまり光のある表層で一旦栄養塩が使い尽く

*東京大学大学院農学生命科学研究科 (Kazutaka Takahashi)

されると、下層にいくら栄養塩が豊富にあっても容易には供給されないのである。従って海洋の基礎生産者は、光の利用できる海洋表層に留まりつづけ、かつ希薄な栄養塩濃度に対処しなければならないという問題をかかえることになる。この問題点を解決するのが小型化である。立体の表面積はサイズの2乗、体積は3乗に比例する。このため表面積対体積の比はサイズに反比例することになる。つまり、サイズの小さいものほど体積に対して大きな表面積比を持つことになるから、粘性の高い水中で摩擦力が働き沈降しにくくなり、また栄養塩摂取効率を高めることができる(谷口 1997)。つまり海の光合成生物は、小型になることによるのみ海洋環境に適応することができるのであり、そういう生物が現在の海洋基礎生産の主体を担う植物プランクトンということになる。

3. 海の生産を支える植物プランクトン

植物プランクトンとは、光合成による独立栄養性をもつプランクトンの一群を指す。様々な分類群から構成されており、Sournia et al. (1991) の見積もりではこれまでに約 500 属 4000 種が記載されている

が、分子生物学の発展により今後その数はさらに増えるであろう。大きさは最も小型である原核緑藻 *Prochlorococcus marinus* の $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ 、大きいものでは珪藻類の一部で $2\sim 3\text{mm}$ に達するものまで幅広い(古谷 2012)。その高い多様性により、水中の様々な光、栄養塩環境に適応して光合成を行い、海洋食物連鎖の基点となっている。海洋の基礎生産者としては、この他、海藻、海草、マングローブ林、サンゴ礁、底生性微細藻類などが挙げられる。これらの単位面積当たりの生産性は非常に高く、生態学的に重要な役割を果たしていることが知られているが、その生息範囲は狭く海洋全体の基礎生産量に占める割合は合計で1割に満たない(表1)。一方、植物プランクトンの生産は単位面積あたりでは上述の沿岸性基礎生産者に劣るものの、その生息範囲は海洋表層全域に及び、結果として海洋基礎全体の生産の9割以上を占めている(表1)。単位面積当たりの植物プランクトン基礎生産量は、光合成に必要な光が届く層(真光層：概ね表面光量の1%が到達する範囲)内に供給される栄養塩量に依存しており、栄養塩濃度の高い下層の海水が物理的な力により表層に持ち上げられる湧昇域や、海底や河川など栄

表1 陸域、海洋の様々な生態系における年間基礎生産量 (Kaiser et al. 2020)

海洋および陸上各生態系の年間基礎生産量 (Pg C yr^{-1})	
海洋	
植物プランクトン	
温帯偏西風海域	16.3
熱帯・亜熱帯貿易風海域	13.0
沿岸域	10.7
極域	6.4
湿地帯・干潟・大型藻類	1.2
サンゴ礁	0.7
} 48.3 Pg C yr^{-1}	
陸域	
熱帯雨林	17.8
サバンナ	16.8
耕作地	8.0
混合林	3.1
針葉樹林 (常緑)	3.1
多年生草本	2.4
広葉樹林 (落葉性)	1.5
針葉樹林 (落葉性)	1.4
広葉樹林 (裸地)	1.0
ツンドラ	0.8
砂漠	0.5
} 56.4 Pg C yr^{-1}	
$\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$	

養塩供給源に近接している沿岸域で高くなる。また太陽放射が季節的に変化する中緯度～高緯度海域は、表層水の密度変化により深層の水と鉛直混合することでも栄養塩が供給される。一方、年間を通して強い太陽放射をうける亜熱帯海域では、暖められた表層水が下層の水と混合しづらく、生産が低い貧栄養海域となる。一般に、植物プランクトンの生産の高い海域では、漁獲量が高くなる傾向があり好漁場が形成されやすい。このことから植物プランクトンが海洋生物生産の基盤であることが理解できるが、これらの魚類は植物プランクトンを直接食べている訳ではない。植物プランクトンは魚類が餌料として摂取するには小さすぎる。つまり、植物プランクトンの生産が高次栄養段階の生物に転送されるには、これを摂食する動物プランクトンの存在が不可欠なのである。

4. 海の生産を繋ぐ動物プランクトン

光合成を行わず、植物プランクトンを直接または間接的に捕食して浮遊生活をしている生物群を動物プランクトンとよぶ。分類的には単細胞から多細胞生物まで様々な生物群、例えば、原生動物（鞭毛虫、繊毛虫）、ワムシ類、甲殻類（カイアシ類、オキアミ類など）、に加えて各種大型水生動物の幼生や、クラゲのような大型のものまで含まれる。プランクトンと聞くと目に見えないほど小さい生物群を指すと思われがちであるが、実はその語義には大きさの概念は含まれていない。例えば直径が1mを超えるような、エチゼンクラゲ（浮遊期）も海流に逆らって遊泳することは出来ないプランクトンである。太平洋を横断回遊するクロマグロも、その卵や仔魚期は遊泳力を持たずプランクトンに該当する。これら動物プランクトンの食性は多様であるが、カイアシ類、オキアミ類など優占するグループは小型の植物プランクトンを極めて効率的に摂食する能力を持っている。これらの動物群は魚類が好んで摂餌する数百マイクロンから数センチ程度の大きさであり、植物プランクトンと高次栄養段階を繋ぐ重要な役割を果たしている。

このように小さいものが大きいものに食べられる食物連鎖は、一見自然なように見えるが実は陸上生態系のそれとはかなり異なる。陸上の基礎生産者の主体を構成する維管束植物は体を支えるために

セルロースやリグニンなどを多く含むが、これらは難分解性であり、従って食物連鎖上位に転送されにくい。つまり陸上生態系は、生産された有機物の大部分が一次消費者にとって利用しづらいという特徴があると言える。一方、水中を漂い続けながら限られた栄養塩で増殖しなければならない植物プランクトンは余分な組織や成分をもたず、小型であるため、その全てが動物プランクトンに丸呑みで捕食される。そうして少しだけ大きくなった有機物（動物プランクトン）はさらに小魚によって丸呑みで捕食され、この小魚は大型魚の餌となる。つまり小さい植物プランクトンが起点となり、徐々に大きいものに食べられていく海洋の食物連鎖は、生産された有機物が余すところなく上位栄養段階に利用される非常に効率のよい生産系なのである。

このような食物連鎖が維持されるためには、基礎生産者の更新性の高さが不可欠である。陸上の植物炭素量は海のそれの4-5百倍から千倍程度あると見積もられている一方、年間基礎生産量は両者でほぼ五角である（古谷 2015, 表1も参照）。つまり海洋の基礎生産者である植物プランクトンは、極めて小さな生物量で大きな生産を達成しており、海と陸では基礎生産者の炭素の回転速度（＝生産速度/生物量）が大きく異なっていることを示している（古谷 2015）。植物プランクトンは被捕食や真光層以深への沈降などを差し引いても十分に増殖できる高い更新性をもち、このことにより海洋生態系が非常に効率的な生産を成し遂げることを可能にしている。これが陸上の狩猟と異なり海洋で未だに野生生物を利用したタンパク質生産、すなわち漁獲漁業が成立している理由である。

5. プランクトンと空気と水

上述のとおり、海洋の年間基礎生産は陸上のそれとほぼ同量と見積もられ、その9割以上を植物プランクトンが担っている。つまり、誇張ではなく私たちが呼吸する酸素の2回に1回分は植物プランクトンの活動の産物であるといえる。また、植物プランクトンが光合成により二酸化炭素を取り込むと、水中の二酸化炭素分圧は低下し、その分が大気から海中に溶け込む。この過程により大気中の二酸化炭素濃度は低下することになる。取り込まれた二酸化炭素は有機物として食物連鎖の基点となる一方、利用

されなかったものの一部は表層で無機化され再び二酸化炭素にもどるか、あるいはマリンスノーとなって光の届かない深海へと沈降していく。マリンスノーとは、海水中に漂う有機物凝集体で動植物プランクトンの遺骸や排泄物から構成されている。浮遊生活に適応している植物プランクトンでもその外殻や原形質の比重は海水よりわずかに重く、死後はゆっくりと下層に沈降していく。また動物プランクトンが排出する糞粒は植物プランクトンよりも、はるかに密度が高く、外周がキチン質の膜で覆われているため、非常に素早く下層に沈降する。このような過程により大気から取り込まれた二酸化炭素は数千年スケールで循環する海洋深層へと輸送され、当分の間大気中には戻ってこないことになる。つまり、大気中からの二酸化炭素の除去に寄与しているといえる。

植物プランクトンの生成した有機物は大気中にも輸送される。大気中に漂う有機物は、周辺に水分が凝結する雲核となり、雲の生成に大きな役割を果たす(永尾 2012, Wilson et al. 2015)。水循環を大きな視点で見ると、海域で発生した雲が風で陸域に運ばれ、そこで降らせる雨の量は、陸域から河川水等によって海に輸送される水量と釣り合っている。つまり私たちの利用している水資源は海との循環のなかで供給されているものであり、その運び手である雲の形成にはやはりプランクトンが大きな役割を果たしているのである。

6. おわりに

以上、簡潔ではあるが、海とそこに生息しているプランクトンの役割について概観してみた。普段意識することのないプランクトンという生き物たち

が、私たちの生存の根幹を支える食糧、空気、水の供給に深く関わっていることがおわかりいただけたのではないだろうか。19世紀、海を漂う生き物を初めて「プランクトン」と名付けたドイツの生物学者ヘンゼンは、「海は一つの生き物であり、その血液はプランクトンである」という言葉を残している(谷口 2009)。海は単なる巨大な水たまりではなく、そこに生息する生物を含めて、物質とエネルギーを動かす循環装置であり、プランクトンはその循環を駆動させるために欠かすことのできない要素なのである。プランクトンの役割を理解することは、循環システムとしての海を理解することにつながる。その仕組みを理解し、循環を壊さないレベルで適切に利用することが人類の未来にとって重要である。

7. 引用文献

- 古谷 研 (2012) 恵みを生み出す海洋生態系. p.30-41. 海洋保全生態学, 白山義久・桜井泰憲・古谷 研・中原裕幸・松田裕之・加々美康彦 (編), 講談社, 東京.
- 古谷 研 (2015) 海洋における植物プランクトンの生理生態と物質循環における役割に関する研究. 海の研究, 24 : 63-76.
- Kaiser, M, J., M. J. Attrill, S. Jennings, D. Thomas (2020) *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*, Oxford University Press.
- 永尾一平 (2012) 海洋生物起源硫黄化合物の硫化ジメチル (DMS) による気候調節. *Earozoru Kenkyu*, 27:269-277.
- Sournia A., M.-J. Chretiennot-Dinet, M. Ricard (1991) Marine phyto-plankton: how many species in the world ocean? *J. Plankton Res.*, 13: 1093-1099.
- 谷口 旭 (1997) 海の環境とプランクトン. 大阪微化石研究会誌, 特別号, 第 10 号 : 339-347.
- 谷口 旭 (2009) プランクトンの神秘・地球環境の救世主に. 新・実学ジャーナル (2009.11), 東京農業大学, 67 : 8.
- Wilson, T. W., L. A. Ladino, B. J. Murray (2015) A marine biogenic source of atmospheric ice-nucleating particles. *Nature*, 525: 234-238.