

## 生態系における DHA の生成と蓄積経路の解明に向けた、ラビリンチュラ類を中心とした食物連鎖における脂肪酸プロファイル解析

本多 大輔

ドコサヘキサエン酸 (DHA) は、炭素数 22 で 6 つの二重結合をもつ直鎖の脂肪酸で、網膜や大脳皮質などに豊富に含まれ、記憶力や集中力の維持、学習能力、乳児の行動や視覚発達に関係することが知られている (「食品の機能性評価モデル事業」の結果報告, 消費者庁, <https://www.jhnfa.org/topic133c.pdf>)。このように非常に重要な機能性物質であるにも関わらず、ヒトは十分な量を供給できる生合成を行う代謝系を持たないため、必須脂肪酸として食物から獲得して体内で利用している。食物の中では特に魚介類が豊富に DHA を含んでおり、特にいわゆる青背の魚であるイワシ、サンマ、サバ、マグロなどに豊富である (図 1)。しかしながら、魚類も我々と同様に DHA を十分に生合成できないため、生態系における下位の被捕食者である微細藻類や原生生物が生合成する DHA が、食物網の中で生物濃縮されることで蓄積されていると考えるのが妥当である。ただし、どのような生物が供給する DHA が、魚類全体に対してどれくらい寄与しているのかについては、具体的な生態学的な知見がないのが現状である。すなわち、我々は大本を知らないまま、日常的に魚類などを通して DHA を摂取しているのである。

ラビリンチュラ類は、珪藻類や褐藻類を含む大系統群であるストラメノバイル類に位置するが、葉緑体を欠いているため光合成能力はない生物群である (図 2)。特にその中でもオーランチオキトリウムは、PUFA シンターゼとよばれるポリケチド様合成酵素複合体によって、中間産物が少なく高濃度に DHA を合成していることが特徴であり、安価な培地で増殖速度も大きいため工業的生産が行われている [伊東信 (2016) 海洋と生物 38, pp. 59-65]。また、世界的な海洋調査プロジェクトである TARA Oceans において、環境中の

リボソーム RNA 遺伝子の網羅的部解析データでは、ラビリンチュラ類として次世代シーケンサーで読まれた配列数は珪藻類の約 10%と比較的大きい割合であり、環境中での DHA 生産への寄与が大きいことが示唆されている

[Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941]。さらに、ラビリンチュラ類のアプラノキトリウムは、地球上の一次生産の 20%を担っているとも言われる微細藻類である珪藻類を積極的に捕食することが明らかになり、この生物が海洋生態系で大きな影響力をもっている可能性が指摘されている [Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941] (図 3)。

そこで、本研究ではラビリンチュラ類に注目し、特にアプラノキトリウムが珪藻から栄養摂取する経路、およびラビリンチュラ類が動物プランクトンに捕食される経路において、脂質の組成がどのように変化し蓄積されるのかについて調査した。

まず、アプラノキトリウムとスケルトネマ（珪藻類）の脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した。その結果、特に DHA と EPA の組成において大きな違いがあることが示された。アプラノキトリウムは DHA 90%、EPA 10%の割合で蓄積するが、スケルトネマの組成はほぼ逆転しており、DHA 9%、EPA 91%で蓄積していた（図 4）。

次に、図 3 のように、アプラノキトリウムとスケルトネマを同じ容器に入れた二員培養をして、培養開始直後（0 日目）、1 日後、3 日後、6 日後に生物試料を採取して、2 つの生物が混合した状態での脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した（図 5）。

その結果、スケルトネマが豊富に蓄積している EPA は、アプラノキトリウムによって捕食されて減少している様子が示された。また、アプラノキトリウムが増殖することによって、DHA の量が増加していることも示された。また、これらの脂肪酸の総量は、6 日後には、最大値を示した 1 日後のほぼ半分となっていた。一般的に食物連鎖において、捕食によって栄養段階が 1 つ移行するごとに、被捕食者が持っていたエネルギーは、代謝や排泄などによって捕食者では 10~20%に減じることが知られている。アプラノキトリウムとスケルトネマの二員培養では、DHA と EPA の量に限ったことではあるが、50%程

度の減少にとどまっており、エネルギーの転送効率が極めて高いことが示唆された。すなわち、光合成によって生産された生体物質である EPA が、ラビリントチュラ類によってエネルギー損失が抑えられながら DHA へと効率よく変換されている可能性が示された。

さらに、ラビリントチュラ類を上位の捕食者として想定される動物プランクトンの甲殻類に捕食させ、脂肪酸組成をガスクロマトグラフィーによって分析した(図6)。なお、ラビリントチュラ類には、EPA をほとんど含まず DHA の割合が高いオーランチオキトリウムを選択した。また、ラビリントチュラ類を捕食する海洋の動物プランクトンとしては、カイアシ類が候補となるが、カイアシ類の培養は困難であるため、同じ甲殻類のアルテミアを用いた。

アルテミア(甲殻類)は、炭素数 20 個の EPA を蓄積するが、炭素数 22 個の DHA は含んでいない。脂肪酸の生合成経路として、脂肪酸鎖長伸長酵素と脂肪酸不飽和化酵素があれば、EPA から DHA の生合成が可能であるが、アルテミアはいずれか、あるいはどちらも持っていないことが示された。一方、DHA を豊富に蓄積するオーランチオキトリウムを捕食した場合、アルテミアは DHA を蓄積することが示された。生態系においても、ラビリントチュラ類が動物プランクトンに捕食されれば、上位の捕食者に DHA が供給されることが示された。

珪藻類からラビリントチュラ類への物質転送として、EPA が DHA に効率よく変換される結果が得られたこと、甲殻類がラビリントチュラ類を捕食することで DHA が強化されることが示されたことは、海洋生態系におけるラビリントチュラ類の役割を考える上での基礎情報を提供できたものと考えている。ただし、珪藻類からラビリントチュラ類の食物連鎖における高い生態効率が、EPA と DHA だけのものではなく、生物間のエネルギー転送としても高い効率があるものなのかについては、今後の課題である。また、ラビリントチュラ類が珪藻類の EPA を分解せずに、そのまま吸収しているかも代謝生理学的にも課題として残っている。環境におけるラビリントチュラ類の存在量と合わせて知見を蓄積することで、我々の食卓に並ぶ魚介類を支えているにも関わらず、ブラックボックスとなっている海洋の生態系に光を当てることができると思われる。

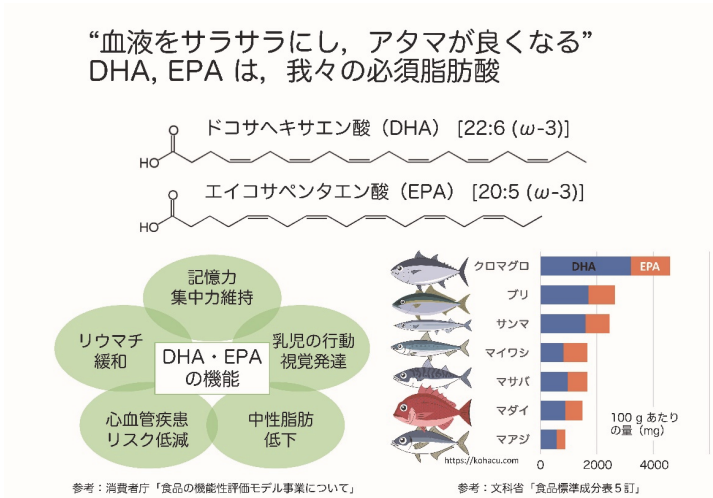


図1 DHA と EPA の化学構造と機能，および魚類における含有

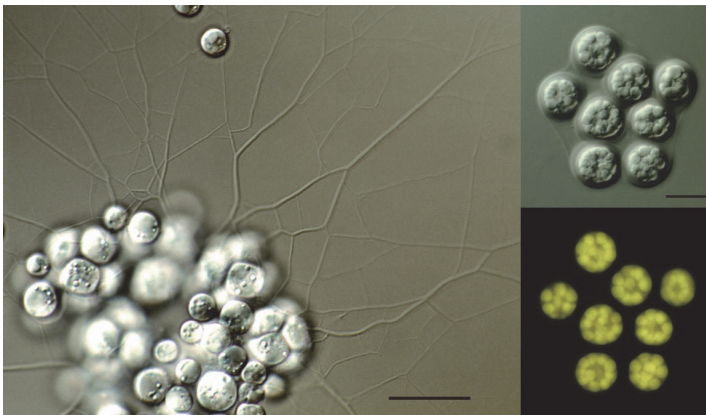


図2 ラビリンチュラ類オーランチオキトリウムの光学顕微鏡像。左はコロニーから放射状に仮足状の外質ネットを展開している様子。右上と右下は同視野像で，上は透過像，下はナイルレッドで脂質を蛍光浅色した蛍光像。スケールバーは左：20  $\mu$ m，右：10  $\mu$ m。

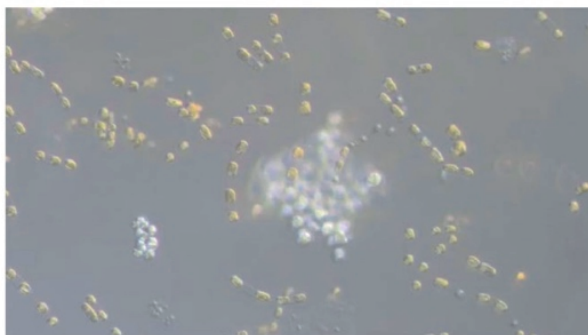


図3 珪藻類スケルトネマ（黄色）がラビリントチュラ類アブラノキトリウム（白色）に捕食される様子。下の約12時間後の様子では、珪藻が捕食されたことで黄色の色素が観察されず、アブラノキトリウムの細胞数も増加している。Hamamoto & Honda (2019) in PLoS ONE 14(1): e0208941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208941>

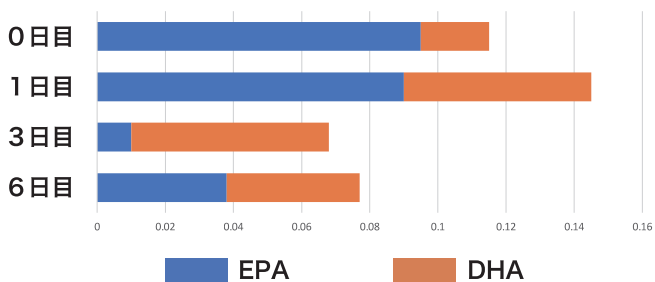


図4 アブラノキトリウム（ラビリントチュラ類）とスケルトネマ（珪藻類）のDHAとEPAの組成比。

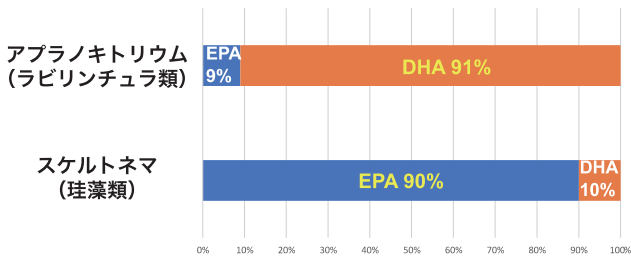


図5 アブラノキトリウム（ラビリンチュラ類）とスケルトネマ（珪藻類）の二員培養における経時的な脂肪酸組成の変化。横軸は内部標準物質を1とした時の脂肪酸の絶対量を示す。

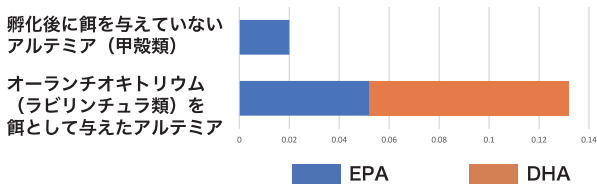


図6 ラビリンチュラ類（オーランチオキトリウム）を捕食させた時のアルテミア（甲殻類）の脂肪酸組成の変化。横軸は内部標準物質を1とした時の脂肪酸の絶対量を示す。