

海の緑を支えるチッソのはたらき



－ 養殖ワカメの色落ちから“光合成”を考える－

徳島県資源管理協議会

吉備国際大学農学部海洋水産生物学科

上田幸男 Yukio Ueta 水産部門

KEY WORD: 葉緑体、チラコイド膜、クロロフィル

はじめに

私が三重大大学水産学部食糧コース水産生物化学教室で卒業論文・修士論文の研究をしていた1981～1984年の話である。研究室のメインテーマはクロノリの品質に関する研究であった。そのため、研究室のデシケーターや冷凍庫の中には有明海、瀬戸内海、伊勢・三河湾、千葉県産などの名立たる産地のクロノリ(板海苔)が分析試料として保管されていた。研究室の匂いもクロノリの香りであった。分析が終わった後には残ったクロノリを艶がある面に熱が当たるように2枚重ねにして石油ストーブの上に魚焼き器を乗せその上でウチワを仰ぐように炙って食べた。高級なクロノリは口の中でとろけるように柔らかく、色、艶、香り、旨味のバランスがとれて美味しかった。クロノリを炙ると黒から緑色に変わるのは、フィコビリルンという紅藻特有の赤い色素タンパク質が熱変性により色が消え、緑色のクロロフィルがより鮮明に見えるからである。そのおかげでクロノリの焼き方を覚えた。アルバイトも三重県松坂市にある三重県漁連のノリ共販場(現のり入札センター)での見付・入札会(共販)の後片付けであった。出荷用にクロノリが詰まった大量のダンボール箱を運び片付けた後は、鼻の穴がクロノリの粉で真っ黒になっていたのをよく覚えている。クロノリの品質は黒さと艶で決まること、当時の養殖クロノリには河川の影響を受け、伊勢湾内の浅場のノリひびで養殖した柔らかいものと湾口の流れの速い深場のウキ流しで育った分厚く黒々とした固いものがあることを教えてもらった。有明海産を頂点にノリひびで育った良質なクロノリは口の中でとろけるように柔らかく寿司用に、ウキ流しで育ったものはオカキなどお菓子向きであることも教わった。そのようなクロノリ中心の研究室であったことから、卒業生の多くは名の知れたノリ関連商社へ就職した。

私はこの研究室で赤潮プランクトンのビタミンB₁・B₁₂要求量と藻体の化学組成について卒論・修論の計3年間研究させてもらった。海水中のチッソやリン、生理活性物質を調べるのではなく、赤潮プランクトンそのものが海水中からチッソやリンを取り込んでどのような成分で保持しているのか調べた。赤潮プランクトンもクロノリも同じ光合成を行う藻類であったことから、大きさこそ違えども分析手法も同僚や後輩が行うクロノリの手法とほぼ同じであった。ケルダール法によるチッソ含量の分析、比色法による遊離糖や遊離アミノ酸の分析、アミノ酸オートアナライザーによるアミノ酸組成の分析、脂質含量の分析やガスクロマトグラフィーによる脂肪酸組成やステロールの分析、原子吸光によるミネ

ラルの分析などごく基本的な化学分析であった。

研究室のメインテーマがクロノリだったこともあって、指導教官の野田宏行先生から何度も聞かされた三つの話が今でも耳に焼き付いている。

- ① 伊勢湾で一番良いクロノリが収穫されていたのは排水が垂れ流しで四日市の公害が最もひどかった 1970 年代で、必ずしも水質がきれいな海が漁業にとって良いというわけではない。
- ② 品質の良いクロノリとはジワジワとチッソとリンを海水から取り込みながら光合成を行ったものであり、藻体中に遊離アミノ酸やタンパク質が多いものほど良品である。特に中間代謝物である遊離アミノ酸が多いということは活発に光合成とチッソ・リンの取り込み・代謝が行われ、味が良いことである。逆に遊離アミノ酸やタンパク質が少ないということはチッソやリンが不足するにも関わらず光合成が行われ、細胞の中身や機能が十分形成されないまま炭水化物の骨格のみが形成され、板ノリに加工してもパサパサの下級品にしかない。
- ③ クロノリのタンパク質の合成には亜鉛が関係している。

当時はチッソ・リン不足やクロノリの色落ち(写真 1 左)の概念は今日ほど漁師さんや一般人に浸透してなかったが、この三つの話が私の記憶におぼろげながらもずっと残り、大学を離れてからも頭の片隅に残っていた。おそらく、徳島県も三重県と同様に東向きに海が開け、海に栄養塩を供給する一級河川が多く、藻類養殖が盛んで水産試験場の藻類研究も活発であったからであろう。



写真 1. 色落ちした養殖クロノリ(左)と養殖ワカメ(右)、写真のクロノリは齋浦(2013)、ワカメは牧野(2014)より。クロノリは色落ちすると黒味が減少する。ワカメは色落ちすると下部から黄色くなる。いずれもクロロフィルなどの色素が減少することによる。

学生時代に学んだ化学分析が役立つ

1984 年に徳島県に奉職してからは海洋観測、水産資源および獲る漁業にかかわる研究を

担当していたため、赤潮を含む藻類研究や化学分析は私の頭から徐々に遠ざかっていった。学位も 2000 年にアオリイカの資源生物学的研究で取得し、2003 年に(独)水産総合研究センター西海区水産研究所(長崎市)に移ってから日中・日韓のハモやタチウオなど底魚魚類の生態や資源管理が中心であった。新たに藻類に触れるようになったのは 2006 年に徳島県水産研究所へ戻り、管理職になってからで、もっぱら若い藻類研究者の原稿を見る機会に恵まれた。その頃から著しい高水温化傾向と栄養塩の減少(図 1)が問題になり、養殖クロノリと養殖ワカメの色落ち(写真 1)や水産資源の減少が話題になることが多くなった。そのため、クロノリとワカメの色落ちや栄養塩の減少対策が若い人たちの研究テーマになることが多くなり、一緒に色落ちの解明や対策を考えるようになった。

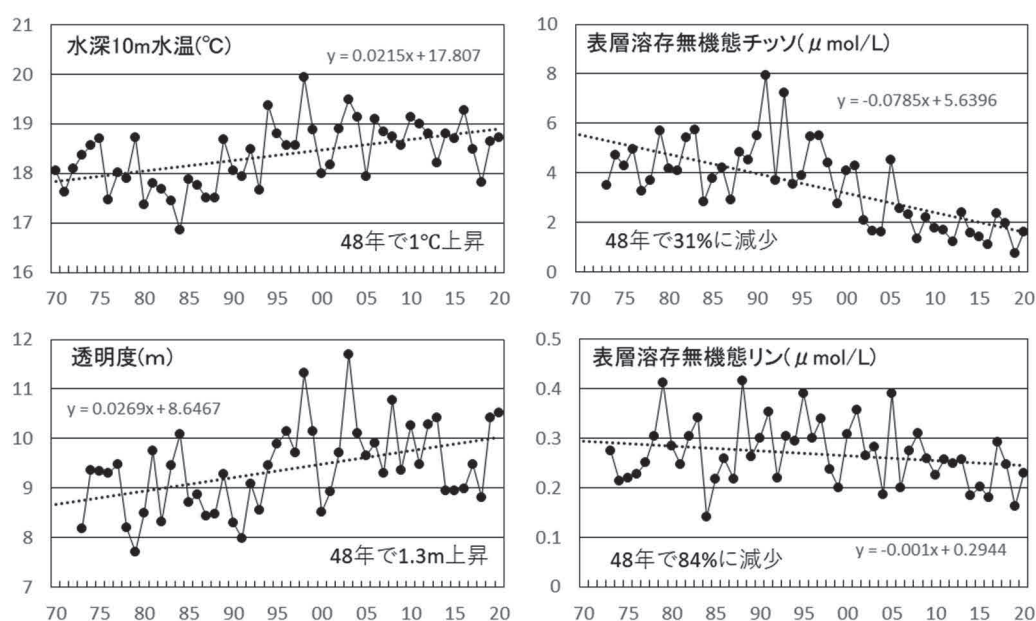


図 1. 図 13-1. 徳島県が漁業調査船「とくしま」により実施した紀伊水道の海洋観測における水深 10m における平均水温、平均透明度、表層における平均溶存無機態チッソおよび平均溶存無機態リンの経年変化。破線は傾向線、数式はその回帰式を示す。水温と透明度は大きく変動しながら上昇傾向に、チッソやリンも大きく変動しながら減少傾向にある。

その過程で、前述した恩師の三つの話や 20 年前の藻類や生化学の研究が少しずつ蘇ってきた。若い人たちと一緒に養殖ワカメの色落ち原因を明らかにする目的で、正常な藻体と色落ちした藻体の化学組成を調べ、ケルダール法や単純な比色分析で、ワカメの色落ちにもチッソの取り込み不足が関係していること、海水中のチッソが欠乏している状態で光合成を行うと黄色い色落ちしたワカメができることがわかってきた。学生時代に恩師が言われた三つの話のうちの二つ、①伊勢湾で一番良いノリがとれていた時期は排水が垂れ流しになっていた公害が最もひどかった 1970 年代であり、必ずしもきれいな海が良いというわけではない。②品質の良いクロノリとはジワジワとチッソとリンを取り込みながら光合成を行った藻体であり、遊離アミノ酸やタンパク質が多いものほど良品であるという恩師の言葉が蘇ってきた。20〜30 年が経過し、伊勢湾から遠く離れた瀬戸内海では昔とは異なる

るレベルのチッソ・リン不足が起こり (図 1)、紅藻のクロノリだけでなく褐藻のワカメでも同じように色落ちが発生し、遊離アミノ酸やタンパク質が少ない、色の悪い美味しくないワカメが生産される現象が時々みられるようになった。今思えば 30 年以上前の公害の反省が強い時代に「チッソ・リンの減少が海藻の品質低下を招き、きれいな海が良いというわけではない」という先生方の先見性を思い知らされるようになった。

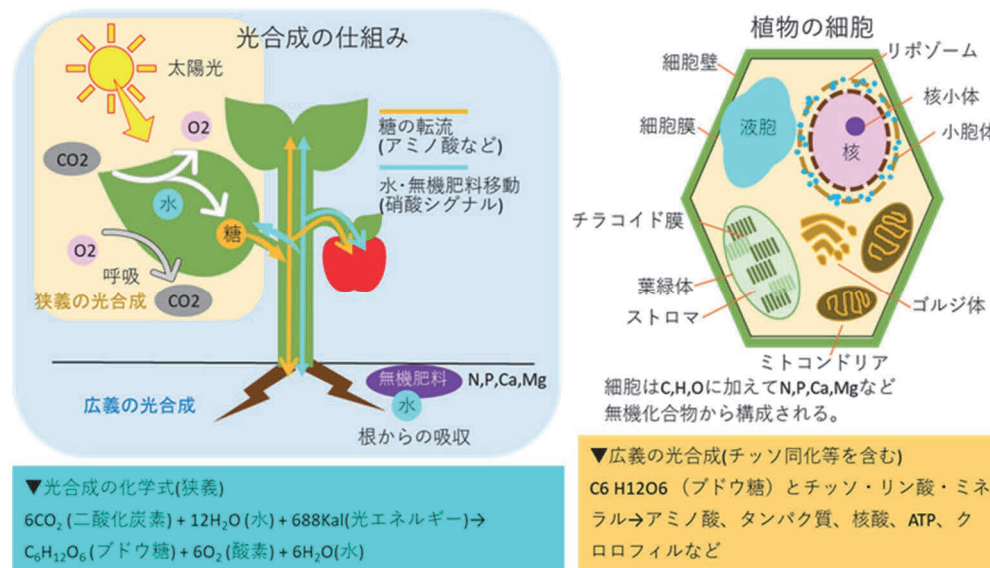


図 2. 狭義と広義の光合成のイメージ図とチッソ化合物を含む植物の細胞。持続的な光合成にはチッソ、リン、ミネラルなどが不可欠である。

光合成について思う

私は植物の生理生化学の専門家でもなく、深い知識は持ち合わせていない。改めて光合成について WEB で調べてみると、小中学生の教科書で習う光合成とは「植物が光によってデンプンなどを作る働き」、高校生では「植物が光によって水を分解して酸素を発生し、二酸化炭素を有機物に固定する反応」、大学生では「光によって環境中の物質から還元力を取り出し、その還元力とエネルギーによって二酸化炭素を有機物に固定する反応」とある。小から大学生レベルでは根から吸収するチッソやミネラルの話は切り離されているが、大学院生レベルでは「光合成とは、光のエネルギーによって環境中から還元力を取り出し、その還元力とエネルギーを用いて行なう代謝系を全て含む反応」という。大学院レベルで定義した場合、事実上、光合成生物の細胞の中のほとんどの反応は、チッソ代謝であれ、硫黄代謝であれ、すべて光合成と考えるべきであるということになる (光合成の教室, 光合成の森より) (図 2)。大学院レベルの考えで植物の光合成をとらえると、植物が光によって水を分解して酸素を発生し、得られた還元エネルギーを用いて二酸化炭素を有機物に固定するとともに、根から吸収したチッソ・リン・ミネラルなどの栄養分を吸収し、植物の細胞や生命を維持する上で不可欠な生体成分を合成する部分も光合成に含まれるようになる。私も大学院生レベルの広義の光合成の方が藻類養殖や色落ちを考える上ではし

つくりくる。付け加えて言うなら、細胞を構成するタンパク質や核酸にはチッソが含まれ、葉緑体のクロロフィルそのものにもチッソやマグネシウムなどが含まれる。しっかり藻体内にチッソ、リン、マグネシウムなどを取り込み新しい細胞、成体成分や葉緑素を生産していかないと正常な光合成と成長を続けられない。

もっとミクロにみると植物には遠い昔にシアノバクテリアが植物の細胞に入り込んで進化した葉緑体(図2)という組織がある。葉緑体の中にはチラコイド膜(図2)という光合成をつかさどる組織がありその中にクロロフィルやカロチノイド色素がタンパク質と巨大複合体を形成することで光合成機能を発揮できるようだ(Kirk 2002、園池 2012)。電子顕微鏡で見るとクロロフィルやカロチノイドがタンパク質の中に埋まっているようなイメージだそう。というわけでこれらの巨大色素-タンパク質複合体を作るためにチッソの供給が不可欠であり、葉緑体は硝酸同化の場合でもあるようだ(Mohr & Schopfer1998)。さらに詳しいことが知りたい方は植物生理学(Mohr & Schopfer1998)を参考にされるとよい。

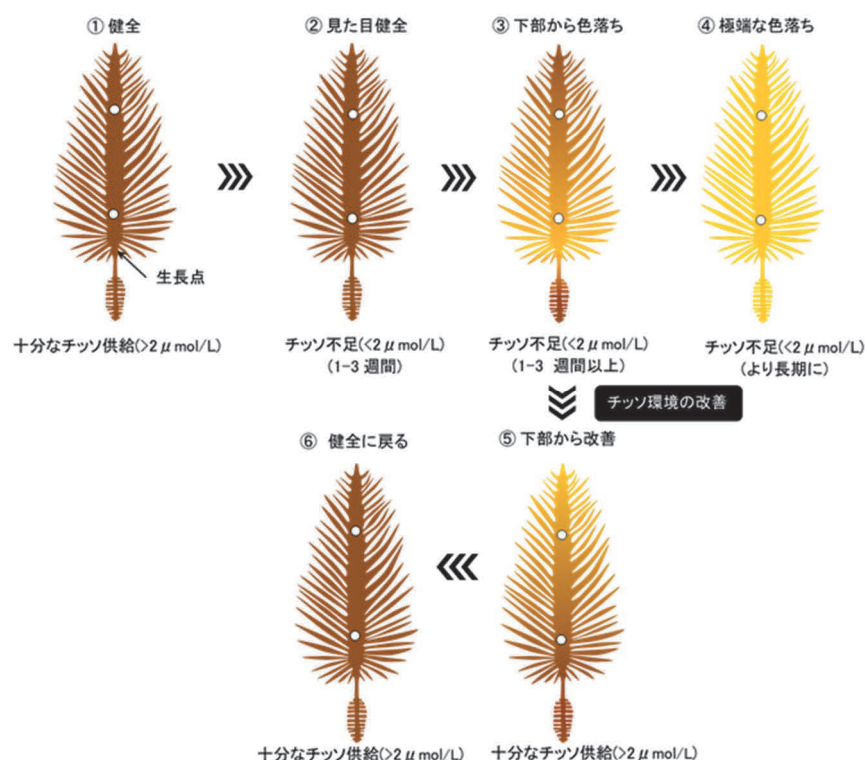


図3 ワカメ色落の進行と回復のイメージ図。チッソ環境の改善とは海水中のチッソの増加や施肥などによる。色落ちが発生してもチッソ環境が良くなれば下部から回復する。

ワカメの色落ちと光合成の深い関係

海水中のチッソやリンが減少することによりワカメの色落ちが発生することは、室内試験からも野外調査からも明らかにされている(図3)(萩平 2005、牧野ほか 2015)。チッソが

減少しても養殖セットの遮光や沈下により光合成反応を低下させれば、色落ちがストップすることも明らかにされている(牧野ほか 2015)。また、池脇ほか(2016)はチッソを含む施肥材を漁場に設置することで養殖ワカメの色調が回復することを明らかにしている。前述した広義の光合成の考え方でいくと、色落ちとは炭水化物の合成まではうまく進むが、チッソ同化がうまくいかない不完全な光合成と考えることもできる。さらに Endo *et al.* (2017a) はワカメの葉片の培養試験から栄養無添加、光量の増加、水温の上昇の組み合わせは光合成色素含有量を低下させることを報告した上で、春季には栄養の添加やより深い水深からの養殖が効果的なことを提言している。多くの藻類養殖業者に知ってもらいたい大切な研究成果である。

森でも、山でも、草原でも、原っぱでも、藻場でもチッソやリンを添加しなくても植物は順調に育つ。これはまったく、チッソやリンがなくても植物が生育するのではなく、少ないながらも効率的にチッソやリンが植物に取り込まれ、動物の営みや雨などによって補給され、うまく循環しているからである。

一方、高密度に商品作物(植物)を育てる田畑や果樹園では肥料なしでは生育が不十分であったり、生理障害が発生したりして作物の経済価値や生産性が低下する。このため古くから生産者レベルでの施肥や肥しの概念があったと考えられる。海のクロノリやワカメなどの養殖藻類は栽培の歴史が浅く、高度成長時代の無処理の排水が海に排出されていた時代までは海水中に十分な量のチッソ・リンがあったために生産者レベルでの施肥の概念が醸成されていなかったと思われる。赤潮被害を防止し、きれいな海を守るため、排水処理施設が整備され、水質管理が行届いた今日では、海水中のチッソ・リンが減少し、施肥なしでは養殖が難しくなりつつある。海は田畑や果樹園と異なり、スケールが著しく大きく、水という媒体が三次元にダイナミックに動き、しかも海は公のものであり、自由にチッソやリンを増やすことができず、対策が難しいのは言うまでもない。

チッソ・リンが 1970 年当時に比べて著しく減少していることは、推定ではなく長年の海洋観測データに基づく紛れもない事実である(図 1)。㊦排水処理場の整備によるチッソ・リンの取り上げ、㊧高水温化による鉛直混合の低下により底層のチッソ・リンが表層に持ち上がらないこと、㊨珪藻等植物プランクトンによるチッソ・リンの横取り、㊩チッソ・リンを豊富に含む深層水の流入量の減少、㊪農業肥料の過剰な散布の減少、およびこれらの複合要因が推測されるが、なぜ海水中のチッソ・リンが減少しているのか今のところ明らかではない。加えて本来北方系の海藻である瀬戸内海のワカメなどの生育にとって高水温化傾向(図 1)はマイナス要因である。

浜で話を聞くと、昔は誰でも普通に良いノリやワカメを収穫することができたが、近年は水温、栄養塩、日照、アイゴやクロダイなど食害生物の影響を考慮して、種付けや沖出しのタイミングを考えないとうまく養殖できなくなったという。秋が短く四季から二季へと言われる気候の変化は藻類養殖をより難しくしている。このため漁場環境に適した種苗の導入や種付け、沖出し、収穫等のタイミングを的確に把握するためリアルタイムでの海

水温やチッソ・リンなどの情報提供が重要になっている。

今後も色落ちの原因究明や対策は徐々に進んで行くと思うが、大切なことはできるだけ早く、海水中のチッソ・リン不足に対する共通の認識を持ち、藻類養殖に必要な最低限のチッソ・リンを供給する施策を講じ、技術を開発することである。一方で、過去には水質汚濁や赤潮による漁業被害があったことは忘れてはいけない。藻類養殖の施肥においても、養殖藻類の栄養生理について十分理解し、効率的かつ最低限のものにすべきである。

おわりに

これまで私が理解していた光合成とは「植物が光によって水と二酸化炭素から糖などを作る働き」(狭義バージョン)と置いていたが、ワカメの色落ち研究を経験してからは糖からアミノ酸、たんぱく質、核酸、ATPなどのチッソ化合物の生産に繋がっていくことから、「チッソ、リン、ミネラルの吸収・同化を含めた光合成」(広義バージョン)の方が理解しやすいと思うようになった(図2)。できれば、小中高大の理科教育の光合成においてもチッソ、リン、ミネラル代謝まで含めて教えた方が、未来の世界の環境や食糧問題を考える上で役立つかもしれない。水産分野だけでなく農林業関係者や教育関係者の意見も聞きたいものだ。

謝辞

富栄養化で赤潮被害が多かった1980年代に藻類研究を通じてチッソ・リンの大切さと研究の楽しさを教えて下さった恩師・野田宏行先生に、心より感謝申し上げます。1968年から今日に至るまで漁業調査船「とくしま」の運航、維持管理、海洋観測に携われた全ての方々から心から敬意を表します。また、本稿の作成にあたり貴重なご助言をいただいた和田隆史氏に感謝します。

参考文献

- Endo, H., Okumura, Y., Sato, Y. & Agatsuma, Y. 2017a. Interactive effects of nutrient availability, temperature, and irradiance on photosynthetic pigments and color of the brown alga *Undaria pinnatifida*. *Journal of Applied Phycology*, 29, 1683-1693. DOI: 10.1007/s10811-016-1036-8
- 萩平 将 2005. ノリ・ワカメ養殖漁場の栄養塩. 水研だより 第53号,
<https://www.pref.tokushima.lg.jp/tafftsc/suisan/material/suikendayori/>
- 池脇義弘・牧野賢治・西岡 智哉・平野 匠・上田幸男 2016. ゼラチンを用いた藻類養殖用施肥剤の開発. 日本水産学会誌 82: 917-922.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/suisan/advpub/0/advpub_16-00005/_pdf/-char/ja
- Kirk, J.T.O. 2002. 水圏の生物生産と光合成(山本民次訳). 恒星社厚生閣, 東京, pp.1-387.
- Laboratory of Plant Physiology, Waseda University. 光合成とは?. 光合成の教室, 光合成の森, <https://photosynthesis.jp/whatis.html>

- 牧野賢治 2014. ワカメの色落ちを計測する. 水研だより 第 91 号,
<https://www.pref.tokushima.lg.jp/tafftsc/suisan/material/suikendayori/>
- 牧野賢治・住友寿明・中西達也・加藤慎治・平野 匠・上田幸男 2015. 養殖ワカメの色落ちのメカニズムと対策. 海洋と生物 218: 254-260.
- Mohr, H. & Schopfer, P.1998. 植物生理学(網野真一・駒嶺穆監訳) Springer, 東京, pp.1-598.
- 斎浦耕二 2013. ノリ・ワカメ養殖で重要な 1〜3 月の栄養塩を予測. 徳島水研だより 第 87 号, <https://www.pref.tokushima.lg.jp/tafftsc/suisan/material/suikendayori/>
- 園池公毅 2012. 今日からモノ知りシリーズ, トコトンやさしい光合成の本. 日刊工業新聞社, 東京, 1- 159.