

光合成とは？

我々人類を含めほぼ全ての生命は、太陽の光エネルギーの恩恵を受けている。その太陽エネルギーを生物が使えるエネルギーに変換する反応が光合成である。光合成(photosynthesis)は、バクテリアから高等植物に至る幅広い生物群によって行われており、地球上の生命を支える重要な化学プロセスである。

このプロセスは明反応と暗反応の二つからなり、明反応では色素分子が光を吸収することで始まる。

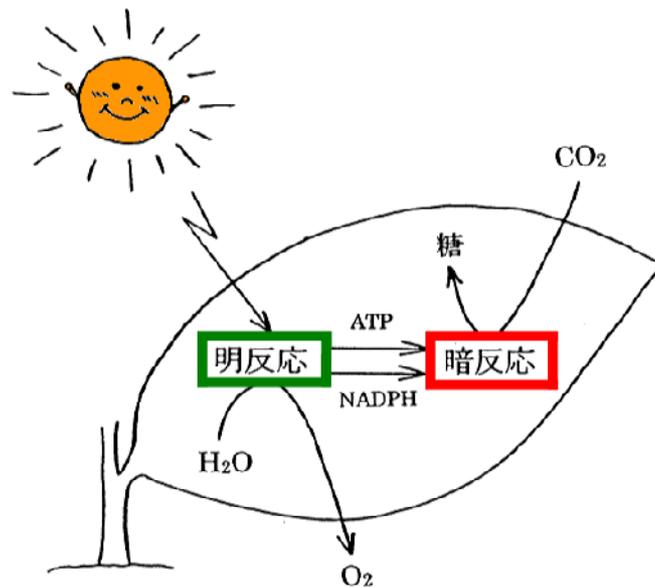


図 1-1 明反応では光エネルギーを受けて H₂O を酸化し、ATP と NADPH を生成する。一方、暗反応ではこの ATP と NADPH を使って、二酸化炭素から糖などの有機化合物を作る。

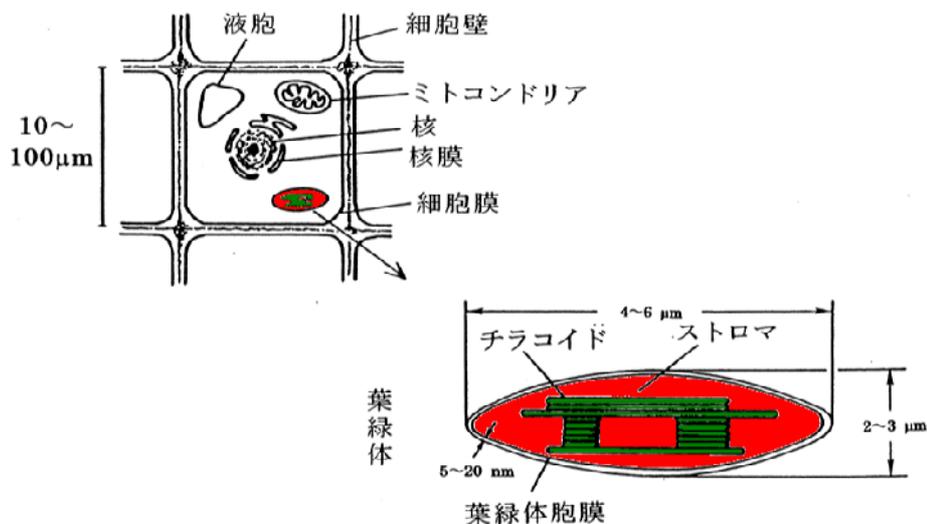
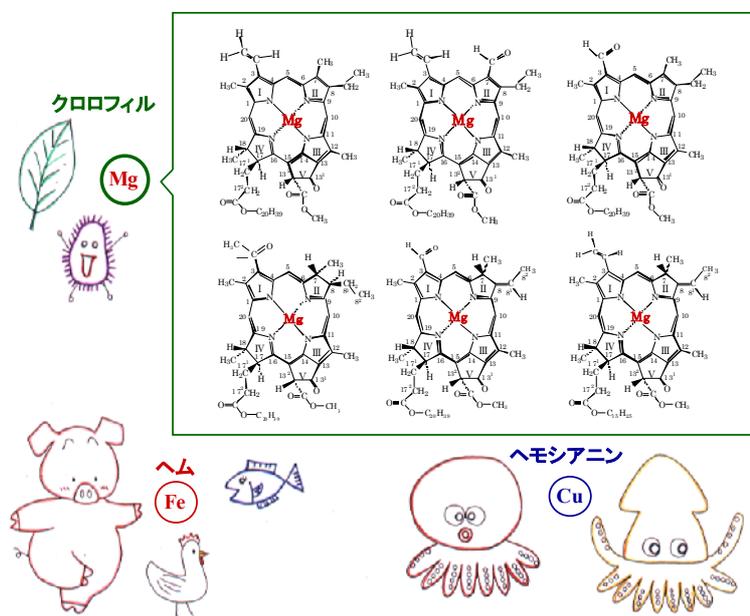


図 1-2 高等植物の光合成の場。細胞内の葉緑体と呼ばれる小器官で光合成が行われる。明反応ではチラコイド膜で、暗反応はストロマで進行する。(バクテリアでは、チラコイド膜の代わりに細胞内膜が同じ役割を果たす。)

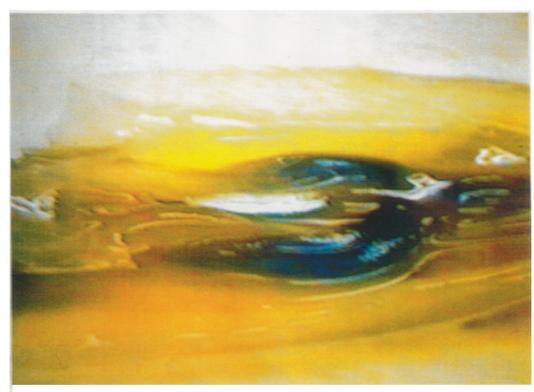
光合成色素

光化学過程に関与する色素を光合成色素と呼び、光合成色素は、クロロフィルを中心に多くの種類がある。光合成の明反応は光合成色素によって高効率で光エネルギー伝達や電子伝達を行うことが出来る。なお、色素の大部分は光吸収および反応中心へのエネルギー伝達をするアンテナ色素として機能している。

クロロフィルは、人間の血液の色素ヘモグロビンと非常に似た構造をしている。血液は中心金属として Fe や Cu があり、また、深海の生物には中心金属を含んでいない白い血液を持つものもいる。しかし、光合成色素クロロフィルの中心金属はどれも Mg である。



Newton 別冊 地球大解剖 教育社 (1998)より

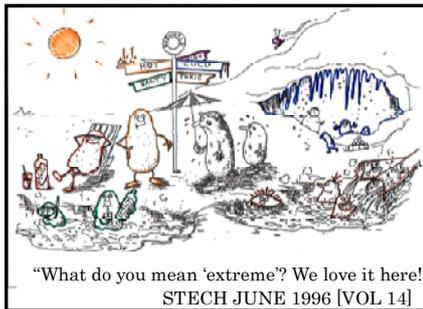


イカの血は青い！
自由研究ハンドブック 仮説社 P.77

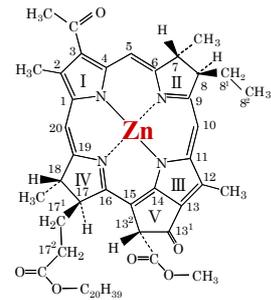
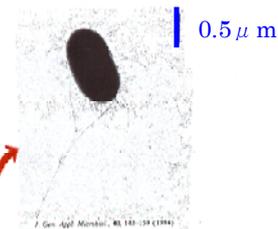
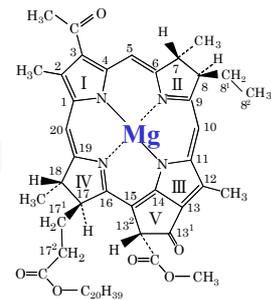
Zn クロロフィルの発見

クロロフィルは酸に弱いため、酸性の場所ではすぐに Mg が脱離してしまう。しかし、近年、pH3でも光合成をしている生物が発見された。そこで、その生物の色素を分析したところ、中心金属が Mg ではなく、Zn であるクロロフィルを初めて発見した。

We love 'extreme'



Zn-BChl a を含む *A. rubrum* の発見



・Acidic hot spring

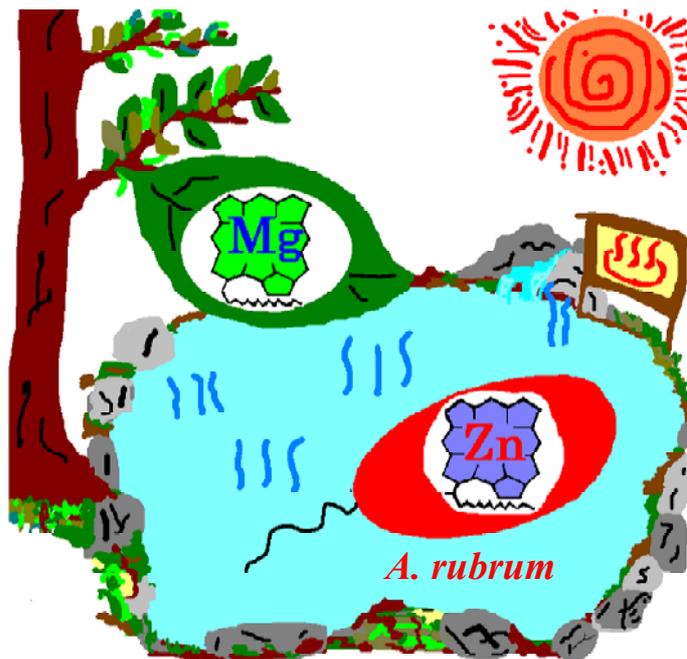
Acidiphilium rubrum

Acidiphilium rubrum

・Waste water of mine

pH 3~4

Strong Acid!!

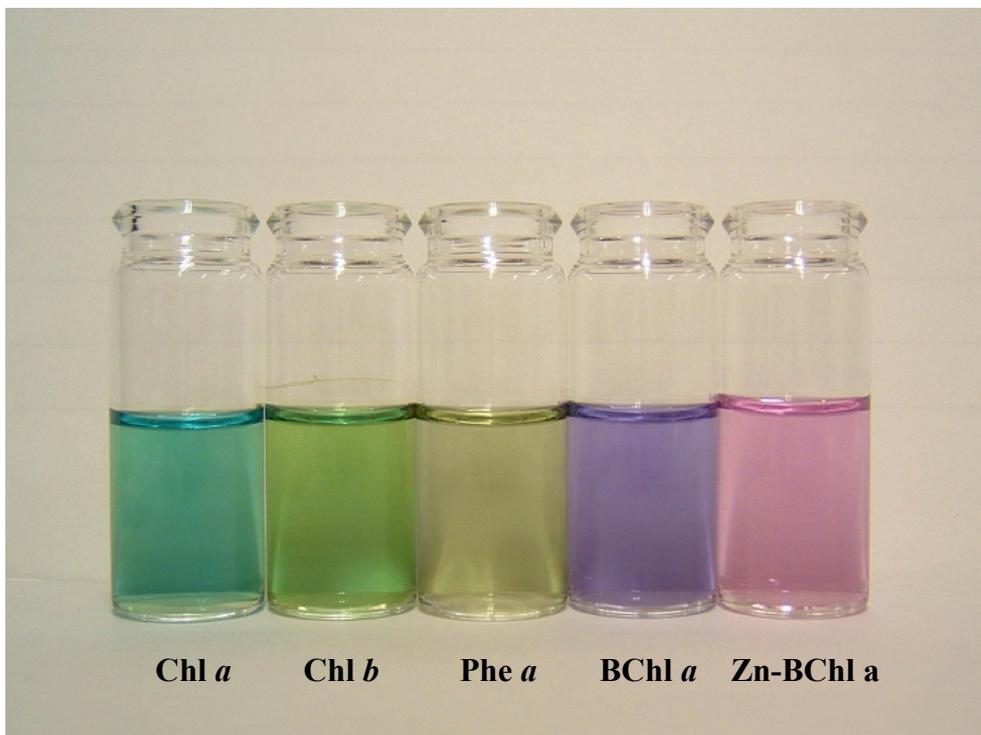


Mg は酸に弱い

④



Mg は酸に弱い、Zn は酸に強い！Cu の入ったクロロフィルは安定なため、食品などの着色に利用されている。



ジエチルエーテル中でのクロロフィルの色。Znクロロフィルの色は何とピンク！

Chl *d* で光合成を行う *Acaryochloris marina*

Acaryochloris marina の発見

Acaryochloris marina (*A.marina*) は1996年にパラオ諸島で発見された。従来の高等植物やシアノバクテリアはクロロフィル *a* (Chl *a*) を用いて光合成をおこなっているが、発見された *A.marina* はクロロフィル *d* (Chl *d*) で光合成を行っていた。

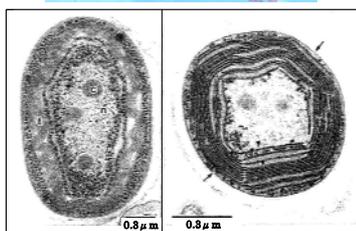
我々は、*A.marina* の色素を精密分析することで、光合成の反応経路を解明しようと研究している。



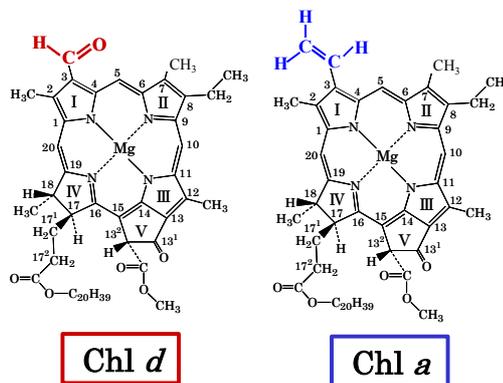
パラオ

1996年 宮下氏ら パラオ諸島の海岸
群生ホヤ中より採取

Chl *d* による酸素発生型光合成



Miyashita, H. et al. (1996) *Nature*, 383, 402



Chl *d*

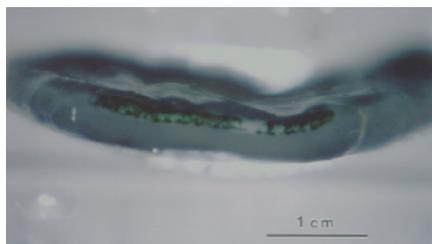
Chl *a*

A.marina の生活環境

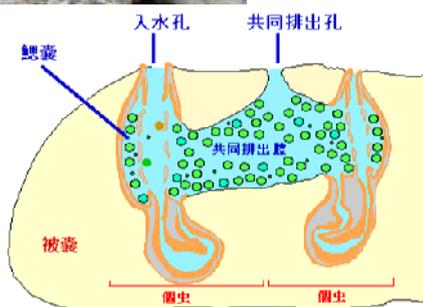
A.marina はホヤの中でほかのシアノバクテリアと共生している。ほかのシアノバクテリアは Chl *a* の光を吸収してしまうため、*A.marina* はその光より長波長の光を吸収しようと Chl *d* を持つようになったと考えられている。



群生ホヤ

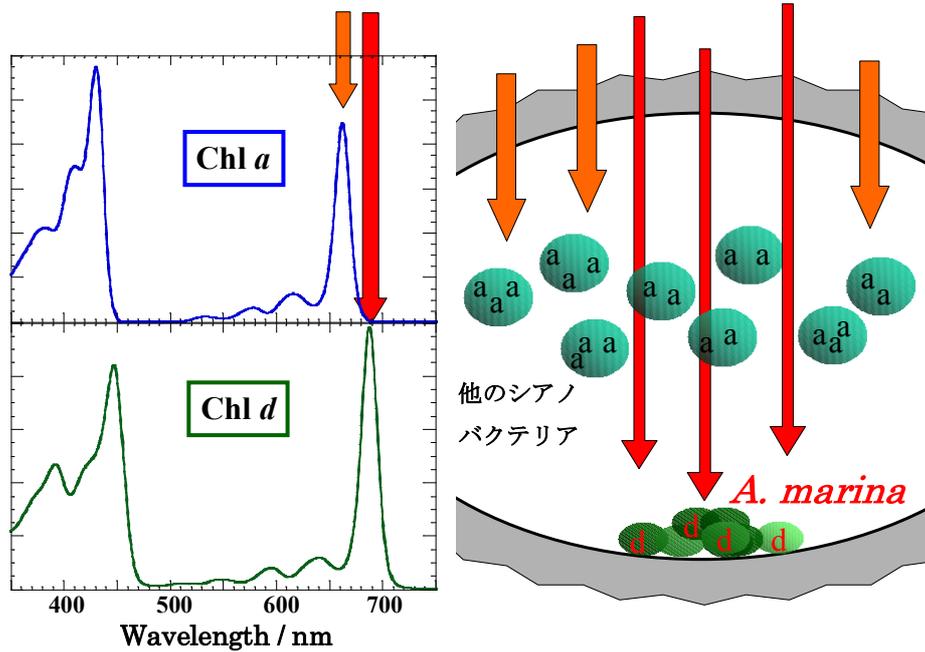


ホヤの切片像



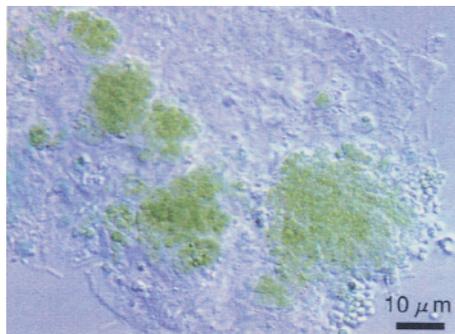
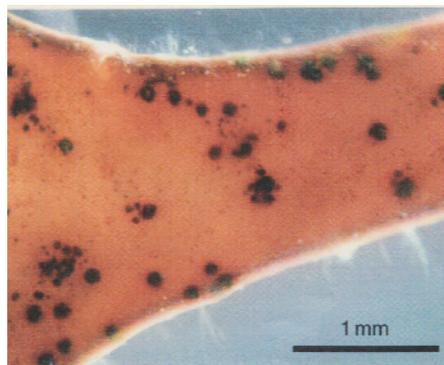
写真・イラスト 提供 宮下氏

⑥



Acaryochloris.sp の発見

近年、*A.marina* と同様に Chl *d* で光合成を行うシアノバクテリアが日本でも発見された。これらも、*A.marina* と同じ光化学系を持っていると考えられている。

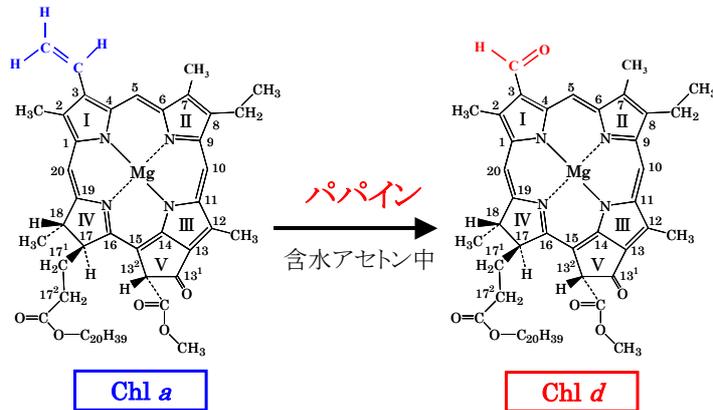


村上ら「遺伝」2004年7月号(58巻4号)

Chl d の生合成経路の研究

A. marina は Chl *d* で光合成を行っているが、どのようにして Chl *d* を持つようになったのかは、まだわかっていない。

我々は、酵素を用いての色素変換の研究で、偶然、パパインが Chl *a* → Chl *d* 変換することを発見した。この結果は、*A. marina* の Chl *d* 生合成経路の研究の一助になると期待できる。



パパイン

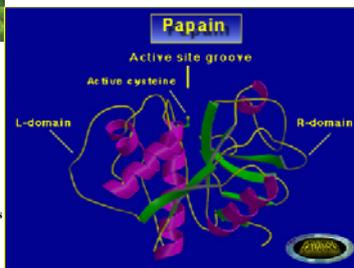


Carica papaya Photo by Napraforgo
<http://www1.plala.or.jp/Napraforgo/picts/>

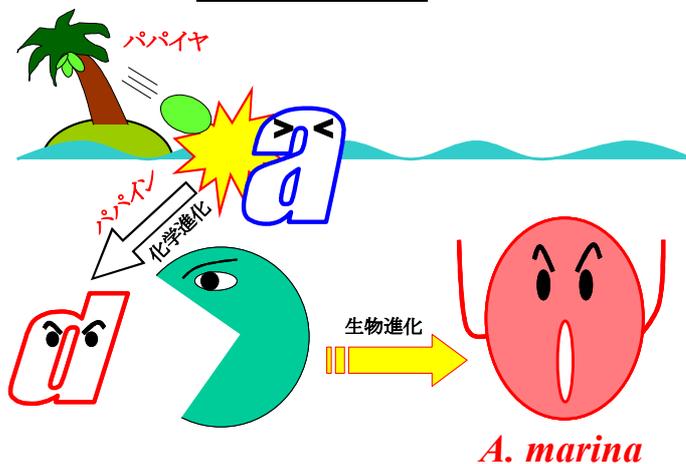
- EC 3.-.-.- 加水分解酵素
- EC 3.4.-.- ペプチド結合を触媒
- EC 3.4.22.- チオールプロテアーゼ
- EC 3.4.22.2 パパイン
- パパイヤ由来
- 分子量 約 23,000

食品や化粧品に利用

Copyright © Thierry MOREAU 1996-2004
 INSERM U618 Université François Rabelais
 2bis, Bd Tonnelle
 F-37032 TOURS Cedex FRANCE
<http://delphi.phys.univ-tours.fr/Prolysis/>



***A. marina* の化学進化**



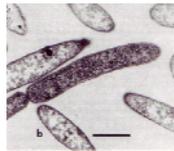
BChl *g* を主要色素とするヘリオバクテリア

⑧

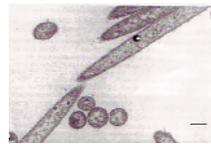
1981年、Indiana大学のBiology学科の建物前の土からBChl *g*を主要色素とするヘリオバクテリアが発見され、1983年にGestとFavingerによって*Heliobacterium chlorum*として発表された。

《ヘリオバクテリアの仲間達》

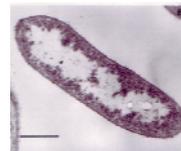
Heliobacillus mobilis *Heliobacterium fasciatum* *Heliobacterium modesticaldum*



Beer-Romero and Gest (1987)
FEMS Microbiol. Lett., 41, 109-114.



Ormerod *et al.* (1996)
Arch Microbiol, 165, 226-234.



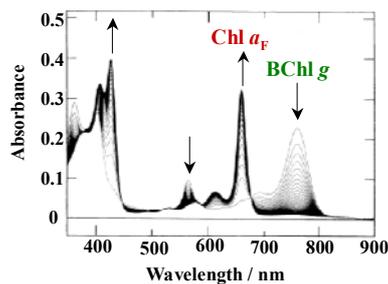
Kimble *et al.* (1995)
Arch Microbiol, 163, 259-267.

生息地・熱帯水田土壌	生息地・熱帯水田土壌	生息地・温泉 火山土壌
至適生存温度・38~42°C	至適生存温度・37~40°C	至適生存温度・50~52°C
至適pH・6.5~7	至適pH・6.5~7	至適pH・6~7

M.T. Madigan, "Bergey's Manual of Systematic Bacteriology",
2nd ed., vol.1, p.625, Springer, New York (2001)

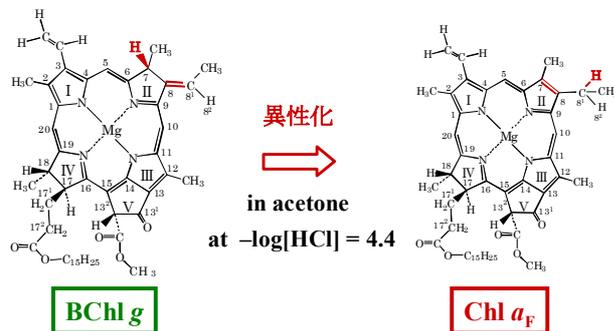
このヘリオバクテリアの反応中心は、高等植物の2つの反応中心のうち、系I型反応中心との極めて高い類似性が指摘されている。また、興味深いことにBChl *g*の7位の水素が8¹位に転移すればChl *a_F*に変身する。我々はBChl *g*がChl *a*に化学進化し、酸素発生型光合成の誕生に至ったのではないかと考えている。

BChl *g* → Chl *a_F* の吸収スペクトル変化



M. Kobayashi *et al.*
Analytica Chimica Acta 365 (1998) 199-203

BChl *g* → Chl *a_F* の異性化



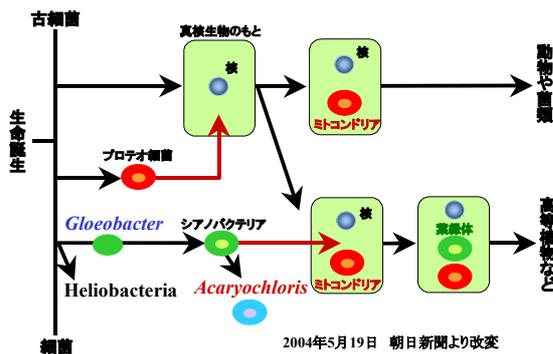
始原的な酸素発生型光合成生物の進化

高等植物は、光合成細菌を祖先とし、シアノバクテリアを經由して高等植物へ進化したと考えられている。近年スイスのマッターホルンで見つかった *Gloeobacter violaceus* は、細胞内膜中で酸素発生型光合成を行う大変ユニークな原核植物である。

スイス・マッターホルン



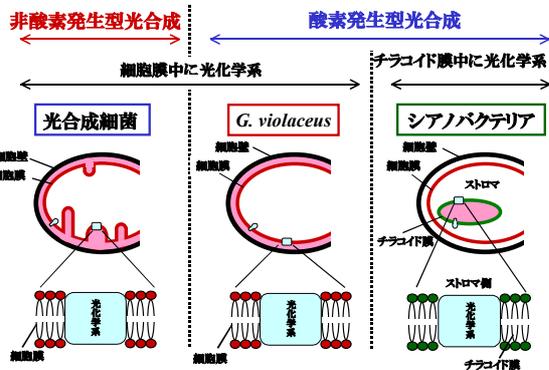
<http://www.geocities.jp/hh2873y/>



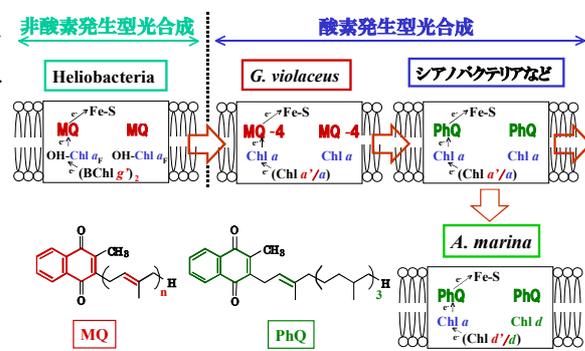
2004年5月19日 朝日新聞より改変

G. violaceus の精密色素分析から、光化学系 I の二次電子受容体(A₁)はメナキノン (MQ-4)であることを明らかにした。クロロフィルおよびキノンの化学進化から、Heliobacteria → *G. violaceus* → シアノバクテリアと生物進化したと推定される。

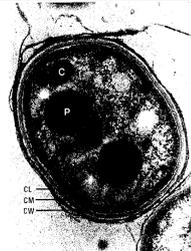
Gloeobacter violaceus の光化学系



クロロフィルとキノンの系 I 型反応中心の進化



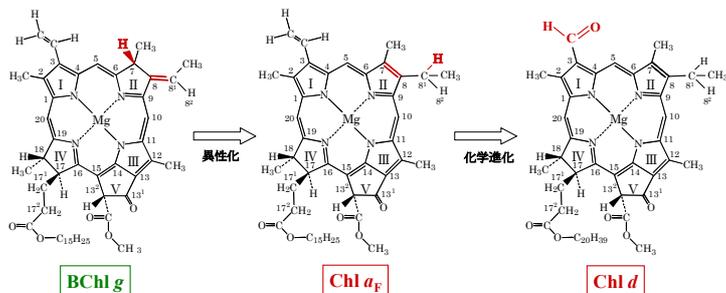
Gloeobacter violaceus PCC 7421



Thin section of a single cell of strain 7421. CW: cell wall; CM: cytoplasmic membrane; C: cyanophycin granule; P: polyphosphate granule; PC: paracrystalline body. 48750×

Rippka et al. (1974) Arch. Microbiol. 100, 424

BChl g → Chl a → Chl d への化学進化

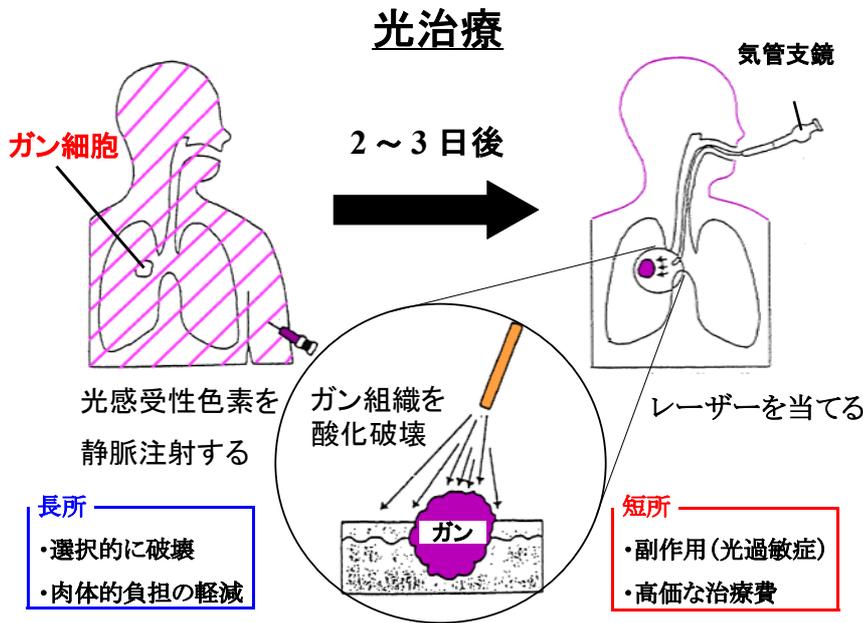


ガンの光治療

(山梨医科大学と共同研究)

ガンの光治療とは？

光治療(Photodynamic Therapy, PDT)とは、光感受性色素の有する腫瘍組織への特異的な集積性と光の励起エネルギーによる殺細胞効果を利用したユニークな治療法である。PDTは旧来のレーザー治療による光凝固や蒸散などの物理的な破壊作用とは異なり、正常組織に大きな障害を与えることなく、病変部位のみを選択的に治療することが可能な新しい治療法である。



光治療用の色素

光治療用色素としては、現在、フォトフリンなどの色素が用いられている。しかし、非常に高価で、副作用も強い為、我々は非常に似た骨格を持つクロロフィルに着目し利用できないかと考え、研究を始めた。

光治療用色素



光感受性色素

フォトフリン注

PHOTOFRIN® INJECTION

ポルフィマーナトリウム注



パセリ

Cc1c(C)c(C)c(C)c1C(=O)O

ブタの血液由来
混合物

高価

21万円 / 75 mg

40万円 / 回

Hematoporphyrin Derivative(HpD)

Cc1c(C)c(C)c(C)c1C(=O)O

植物由来

高純度

安価

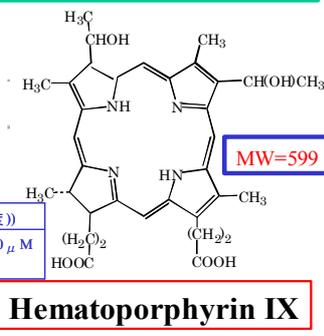
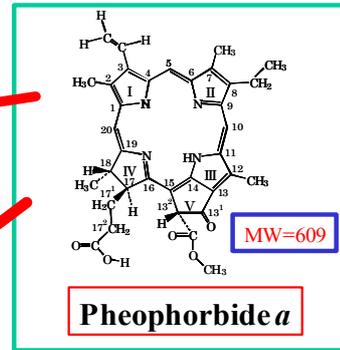
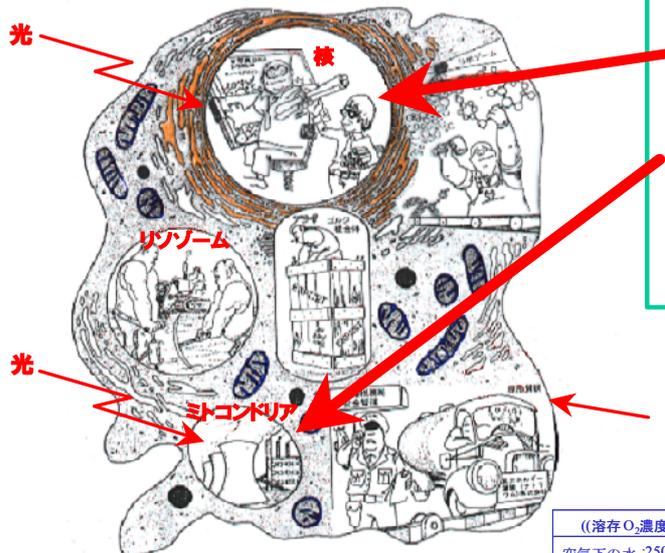
1万円 / 50 mg

Chlorophyll a

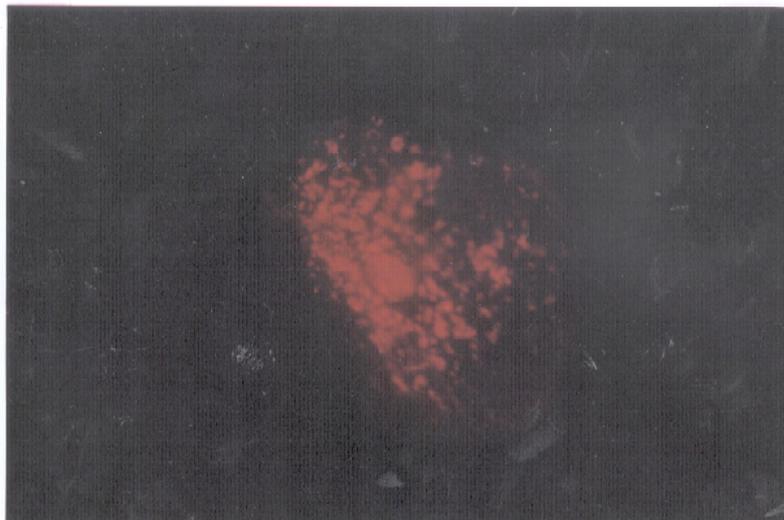
クロロフィルの効果

治療用色素として使用されているヘマトポルフィリンは細胞膜を攻撃するため効果は低い、クロロフィルから生成したフェオフォーバイドは核やミトコンドリアを攻撃することができる。

光治療におけるフェオフォーバイドの作用位置は？



“Membranes and their Cellular Functions”
J.B.Finean,R.Coleman & R.H.Michell(1978)

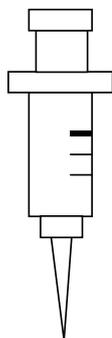


Na-Phde *a*

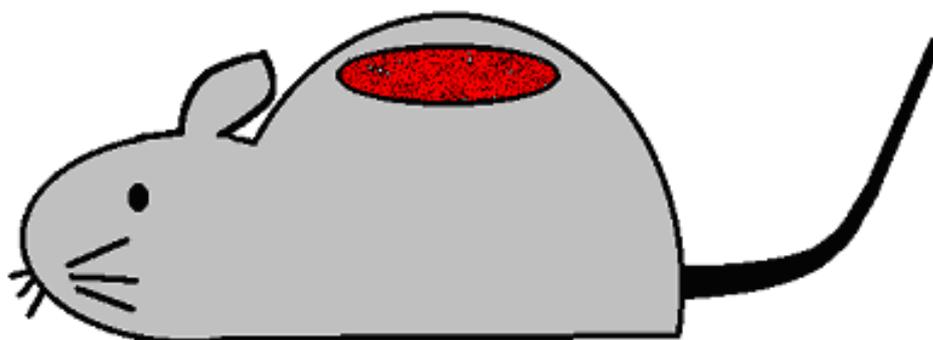
口腔粘膜細胞の核、ミトコンドリア、リソソームに取り込まれたクロロフィルが強く赤い蛍光を発している。

ガン組織に蓄積されたクロロフィル

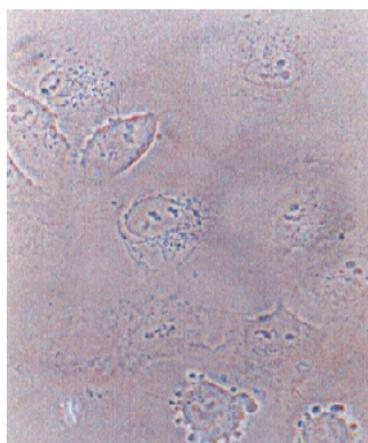
クロロフィルに可視光を照射すると赤い蛍光を発するため、ガン細胞の位置を特定することができる。



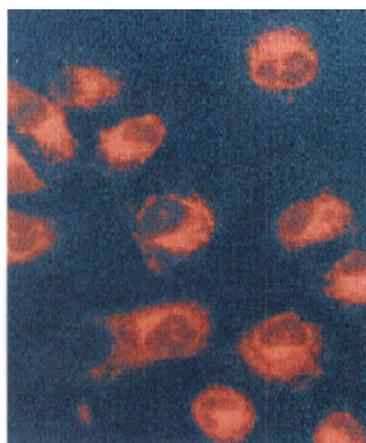
クロロフィルをねずみの体内に注射することで、全身に色素が回り、正常な組織は色素を排出するためガン組織のみにクロロフィルが蓄積する。



がん細胞に取り込まれた Na-Phde a による蛍光



位相写真



蛍光写真

Na-Phde a 浸漬時間=40 μ g/mL
浸漬時間=30 分 浸漬温度=37 $^{\circ}$ C