



1兆分の1秒から30億年： 光合成の分子システムとその進化

「もう決めなければいけない年なのですよ、とりあえず私がひきうけておきましょう」。志望先未定だった私は、こんなふうには1969年東大生物化学・植物生理研究室・高宮篤先生に受け入れていただきました。しかし、「光合成」の研究は面白かった。秋葉腹の部品で手作りの装置からレーザ、光技術やコンピュータ、ゲノム科学の発展にあわせ研究も場所も変わりました。2000年からは名大物理教室（生命理学併任）に加えていただき、「1兆分の1秒刻みで光エネルギーをとらえる物理過程」を知ることも、「北極圏での化石や植物の探索」、「新型光合成の発見」もできました。物理学の中で生命を考えるのは新鮮でした。素粒子や原子、星とともに「生命」もこの宇宙の主役の一つ。「真空3Kの宇宙空間」に浮かぶ「惑星地球」に、「太陽光」が流れ込み「熱」として周波数を変えてまた出て行く。この繰り返しの中で、光合成は光エネルギーを捕え、しばし生命の中にとどめ、分子やタンパク質や細胞を変え、多様な生命を生み出し、大気や環境を変え続けてきました。光合成の分子装置は物理の法則を満たしながら、30億年の進化の名残をとどめつつ、温泉の細菌から地上植物のもつ分子まで、環境にあわせて多様な形で完成されているようです。

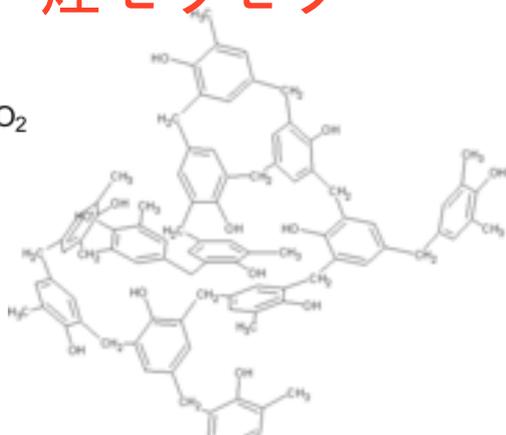
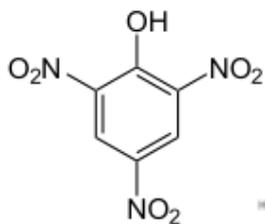
ヒストリー

1947.3.3-

東京 世田谷区等々力

→新宿高校・剣道ヤメ・
化学部

ピクリン酸、ジアゾ色素、
石炭酸樹脂、アクリル樹
脂の合成、生物きらい、
火薬つくり、学園祭で火
山模型 煙モウモウ



東大 理 生物化学専攻

1965-1969,学部、

”Excitingな卒業”

1969-1974 院生

“何しようか”

研究ってクイズみたい!!!

光合成の光反応、遅延蛍光

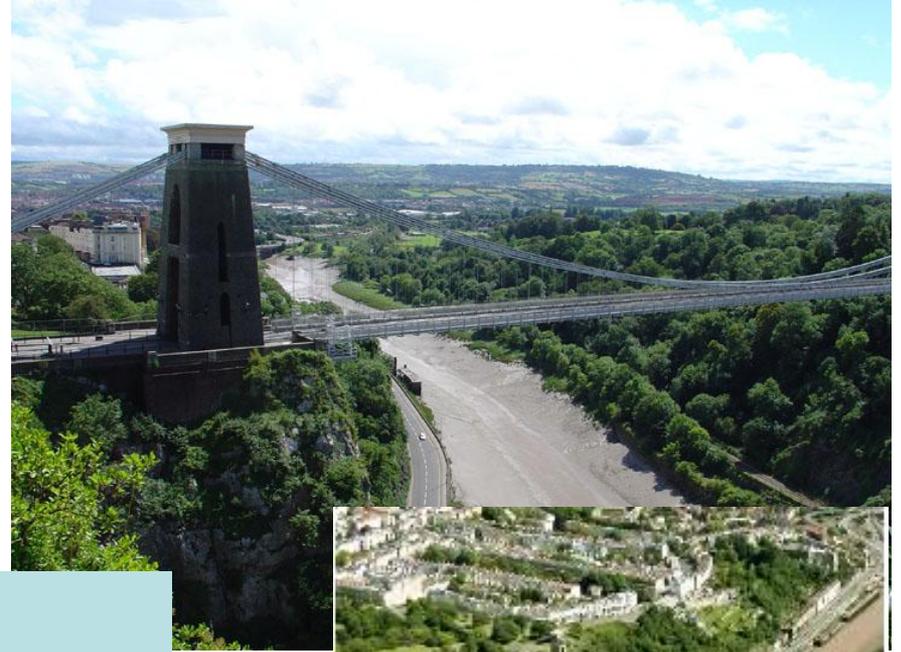
(ホウレンソウ)

自由きままに何となく光合成、装置
やフラッシュを秋葉で部品集めて自
作、

D3スペイン旅行で、ポスDrはヨー
ロッパに行きたい!

競争がしだいに“党争化”していた昨秋 11月22
日夜は 各派合わせて約1万人が構内を埋めた

高沢皓司「全共闘グラフィティ」(新泉社, 絶版)



1974-75
 Bristol Univ.
 Medical School
 Post Doc.Fellow
 (A. Crofts研) 皆まじめ
 に科学してる！ やって
 みるか？料理も！

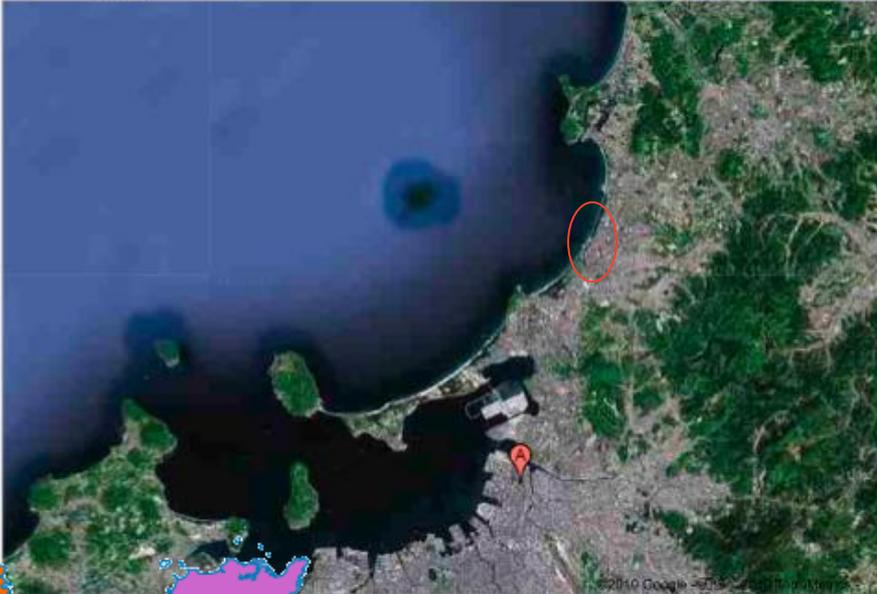
Computerized
 Laser Spectroscopy

Bridge, University
 Park Str



ルート・変更案内 マイマップ

印刷 送信 リンク



九州大学周辺の衛星
net/ - 九州大学のお部屋探しのプロが提供 先ずはココ スポンサーリンク < >



(植物、光合成細菌)

農薬空中散布反対運動



1975-1983 九州大学理
生物 植物生理研究室助手
(西村光雄先生)

光合成電子移動の静電相互作用による制御

(食用)海藻、農薬飛散調査

長女“紫野”誕生



(植物、
光合成細菌、
進化、
カナダに
20億年前の
化石堀)

1983-2000 岡崎国立研究機
構 基礎生物学研究所 光合
成電子移動速度の ΔG 制御

次女 “夕樹” 誕生



基礎生物学研究所 (大学共同利用機関法人自然科学研究機構) HP
<http://www.nibb.ac.jp/about/outline.html> より



2000-2010 名古屋大学 物理教室 G(光生体エネ ルギー)研 教授

光合成のエネルギー移動と電子移動、進化、多様性と人工化

no more babies!

ルート・乗換案内 マイマップ

RSS



名古屋大学理学館
463 ビュー - 一般公開
2008年6月25日作成 - 2009年4月8日更新
投稿: south330minami
この地図に評価を付ける - コメントを投稿

<http://maps.google.co.jp>

 [名古屋大学理学館](#)

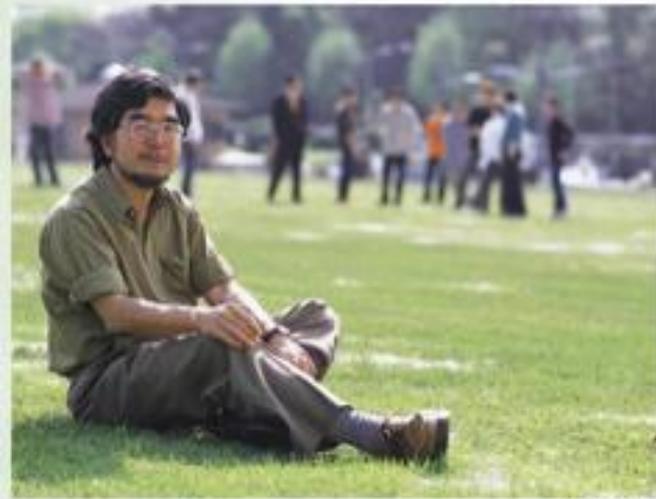
物理が心地よくて、余裕ができた？
2005 名古屋万博にあわせて
アラスカポイントバローに極地植物探査
トヨタ、中研と人工光合成研究

Biophysics group in Nagoya University

Laboratory of Photo-Bioenergetics

G-Lab

**H.Mino, Assoc Prof.
Y.Shibata, Assis Prof.
Y.Kumazawa, Lecturer
Y.Nakamura, Res. As.**



伊藤繁教授

Shigeru Itoh, Prof.



**Ultra-fast Laser Spectroscopy, ESR, Low Temp
Single Molecule Spectroscopy, Molecular Biology
Energy transfer, Electron transfer,
Evolution of Photosynthesis,
Color sensory proteins, Green sulfur bacteria,
Heliobacteria, Purple bacteria, Cyanobacteria, Higher Plants, Lichen, Algae, Mutants**

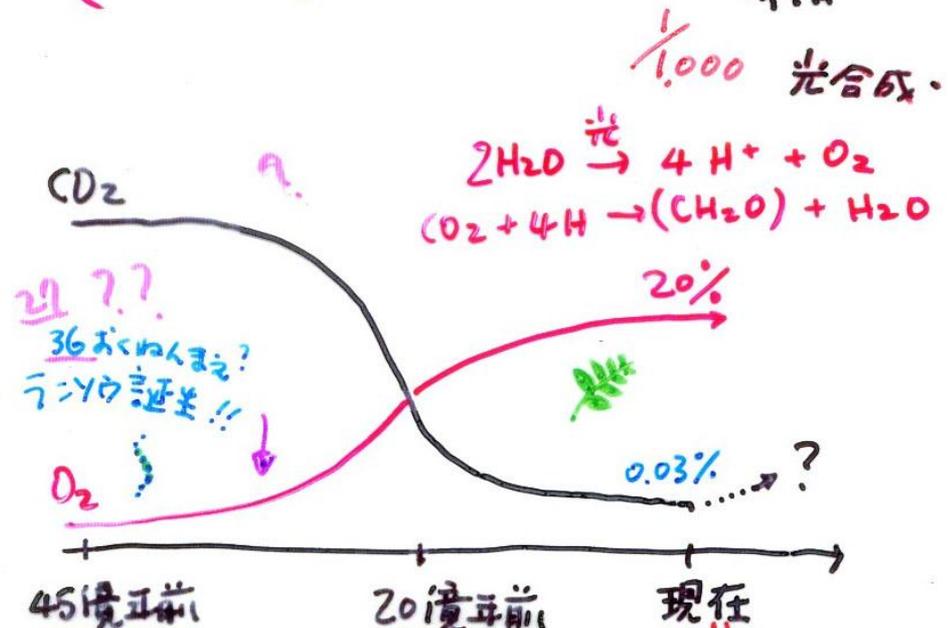
光合成って何？
生物って何？

光のエネルギーは生命を
生み進化を進め、地球環
境を変えた

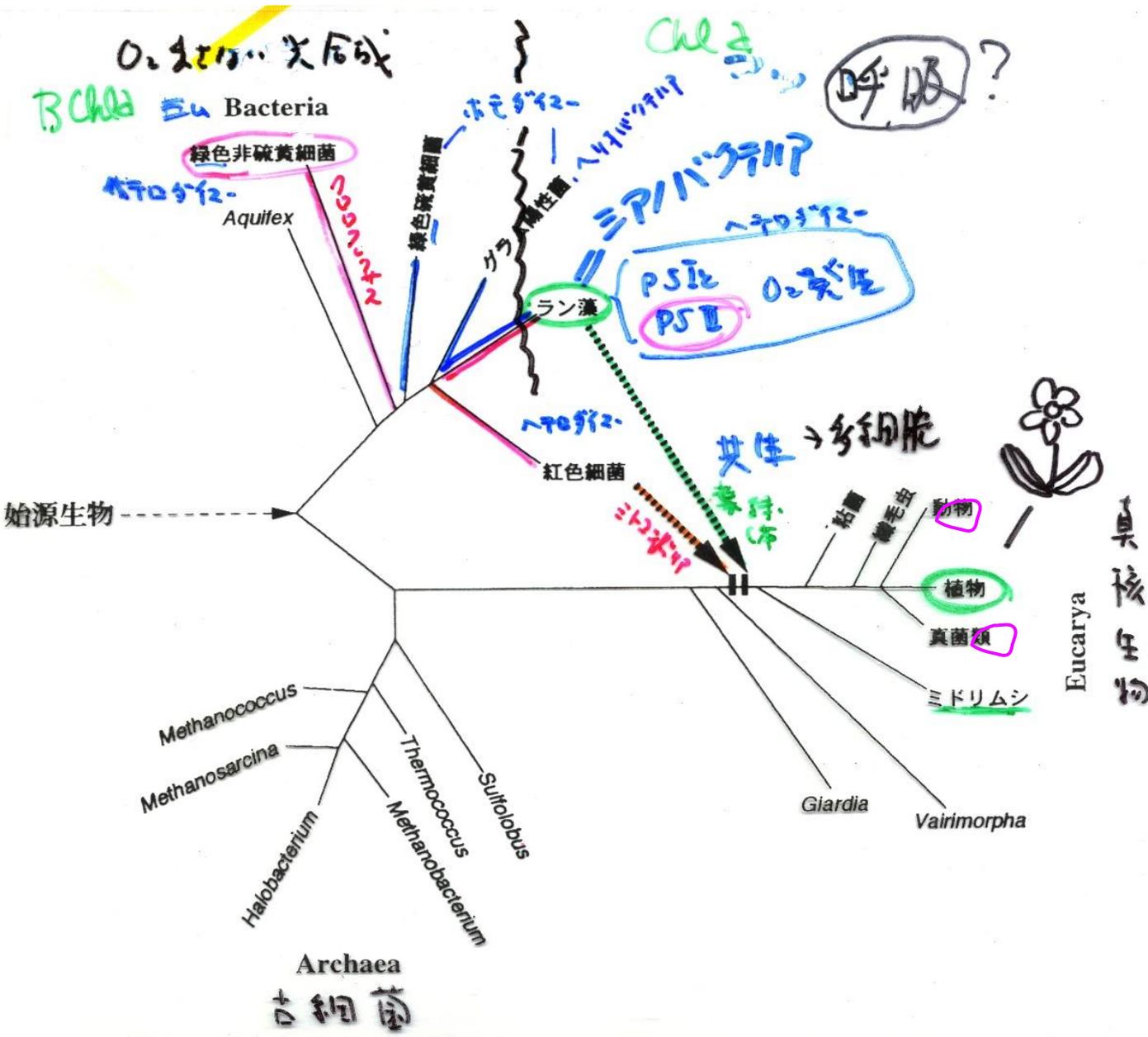
現在とは異なる環境で
生命はうまれた



光合成により生命進化は
加速した



光合成を理解して利用し
たい!



NA 遺伝子の塩基配列に基づく現生生物の分子系統樹。真核生物へのバクテリアの共生によりミトコンドリアと葉緑体が生れる位置を矢印で示す。文献[13]より改変。

光合成の生物学、進化

分子の進化 生命って何？

生命は分子を進化させる装置

特別付録①

野ウサギくんのラブリー元素周期律表

手描き

1 H 水素																	2 He ヘリウム						
3 Li リチウム	4 Be ベリリウム																	5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム																	13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン						
37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテチウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン						
55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57-71 La-Lu ランタノイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスマニウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン						
87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89-103 Ac-Lr アクチノイド																					

水平リーベ
ボクの舟?



生命を作る原子

H,C,N,O

我々は軽い原子でできている

我々はやわらかい

40°C (310K)ならいいお湯だ！ 安定

60°C (330K)なら壊れます！ 分子が変形

もっとあげると燃えだす！ 結合が切れる

不安定な定常状態にいる

紫外線：結合を切る、危険

可視光：使いやすい、
2光子のエネルギーを
足すとうまくつかえる

しかし、生体は意外に強い

0-400Kでもはたらくものもある、火山や海底

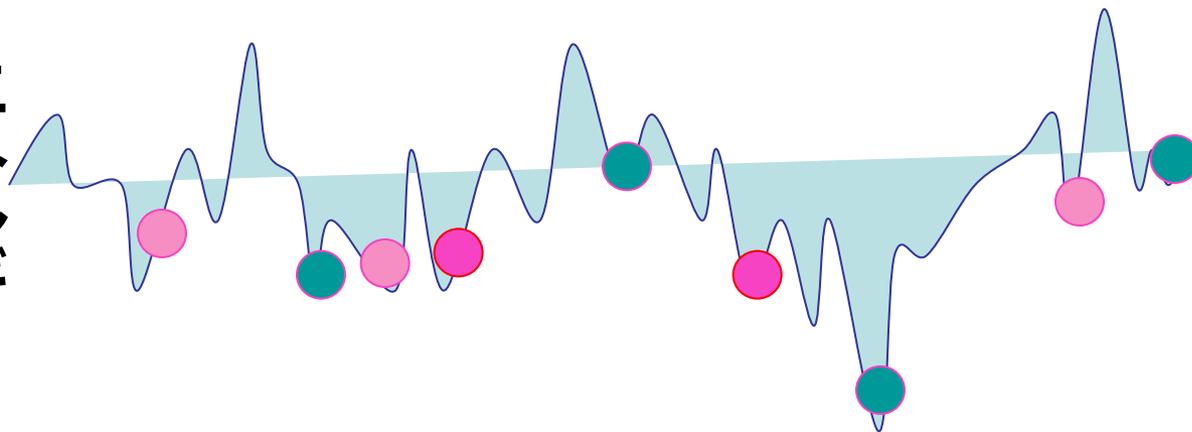
惑星表層：
分子が安定な穏やかな環境

多様な局所条件

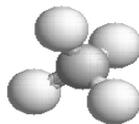
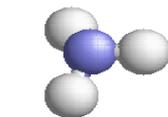
熱と光で原子はつながり、分子をつくる

分子は反応しさらに多様な分子と相互作用を生み出す

↑
エネルギー

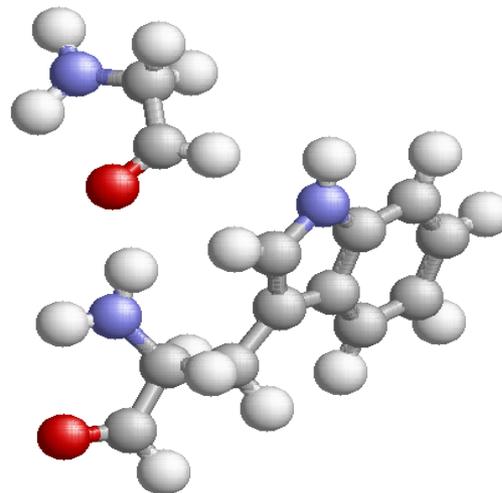


NH₃



CH₄

アミノ酸

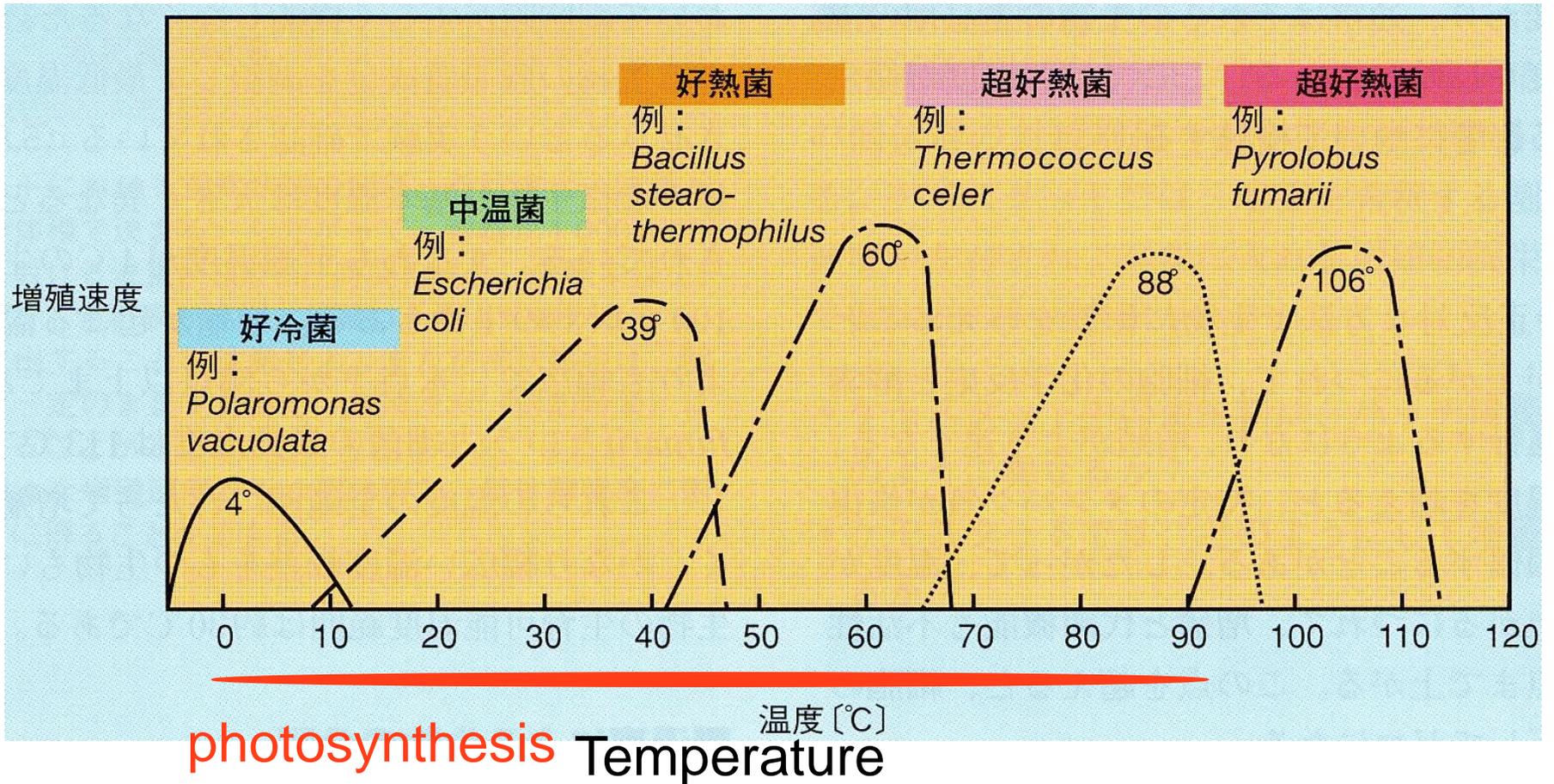


酸素

炭素

窒素

Growth rate and Temperature



Can grow at variety of temperature but not all mighty!

-2 bil.y. Fossils from Numbia
with green spots,

2 years on my office shelf



enlarged

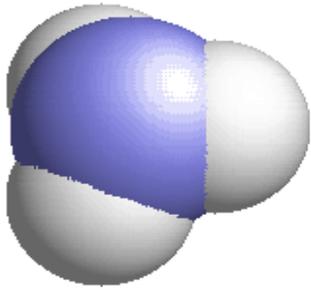
BG11
culture medium

生体系：
特定の目的 = 価値に向かって
最適化する

小さなエネルギー範囲 (eV)中
でのエネルギー極小化

光合成・タンパク質とは何か

グリシン (アミノ酸)

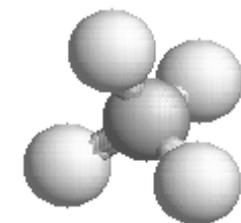
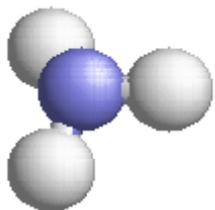


アンモニア



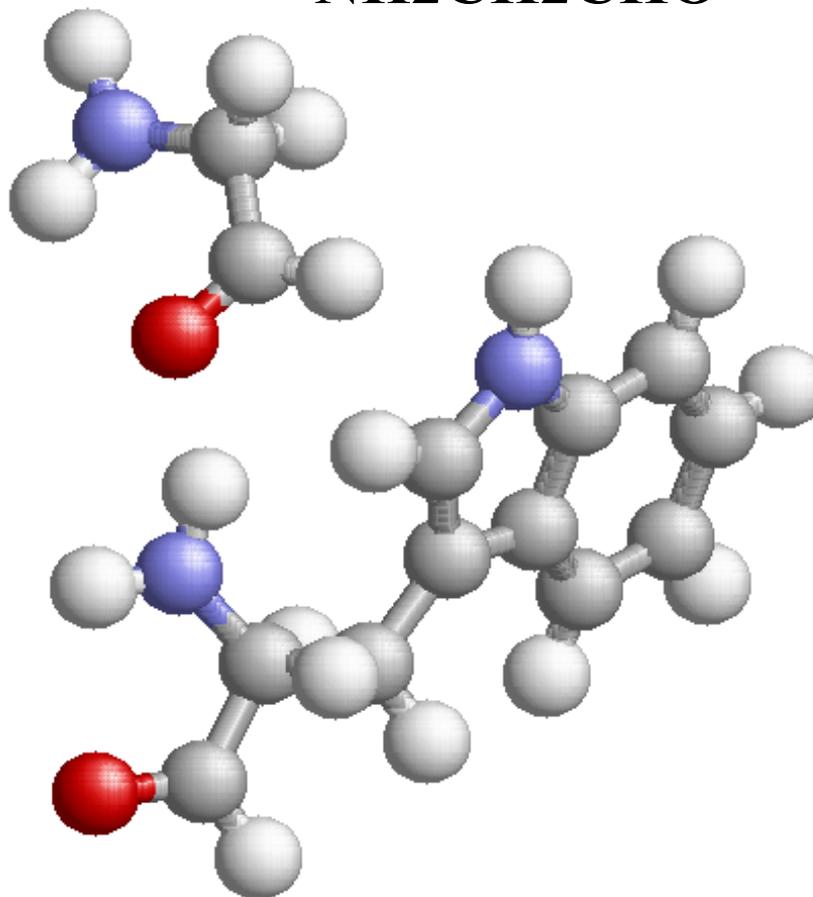
トリプトファン (アミノ酸)

NH3



CH4

NH2CH2CHO



(C P K)

酸素

炭素

窒素

Mg

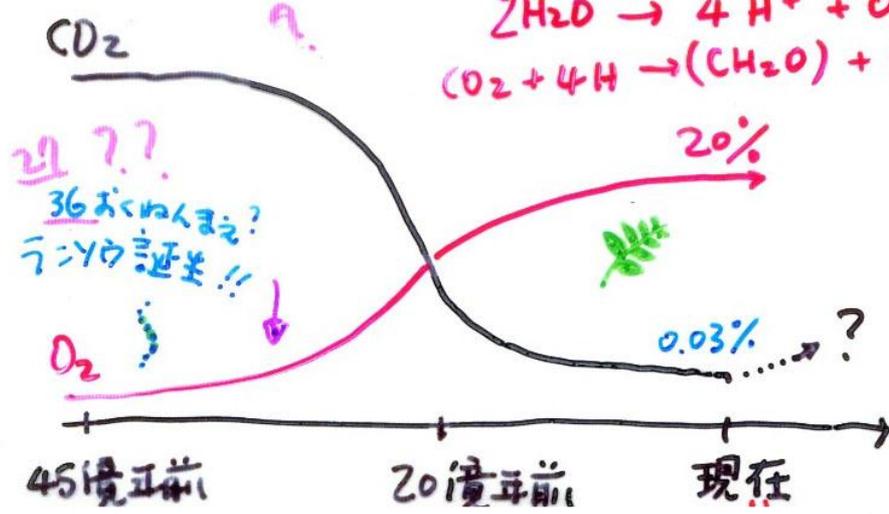
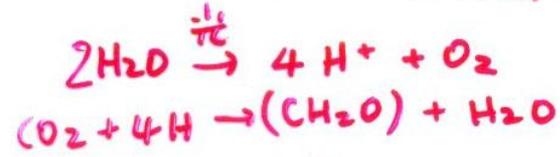
光合成に働く

色素（クロロフィル）

電子受容体（キノン）

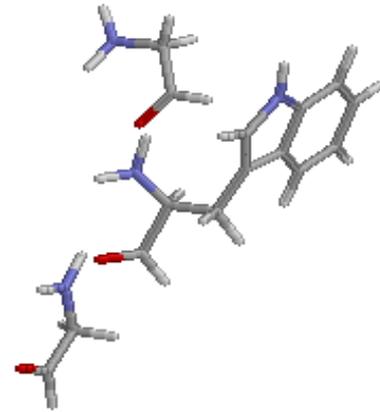
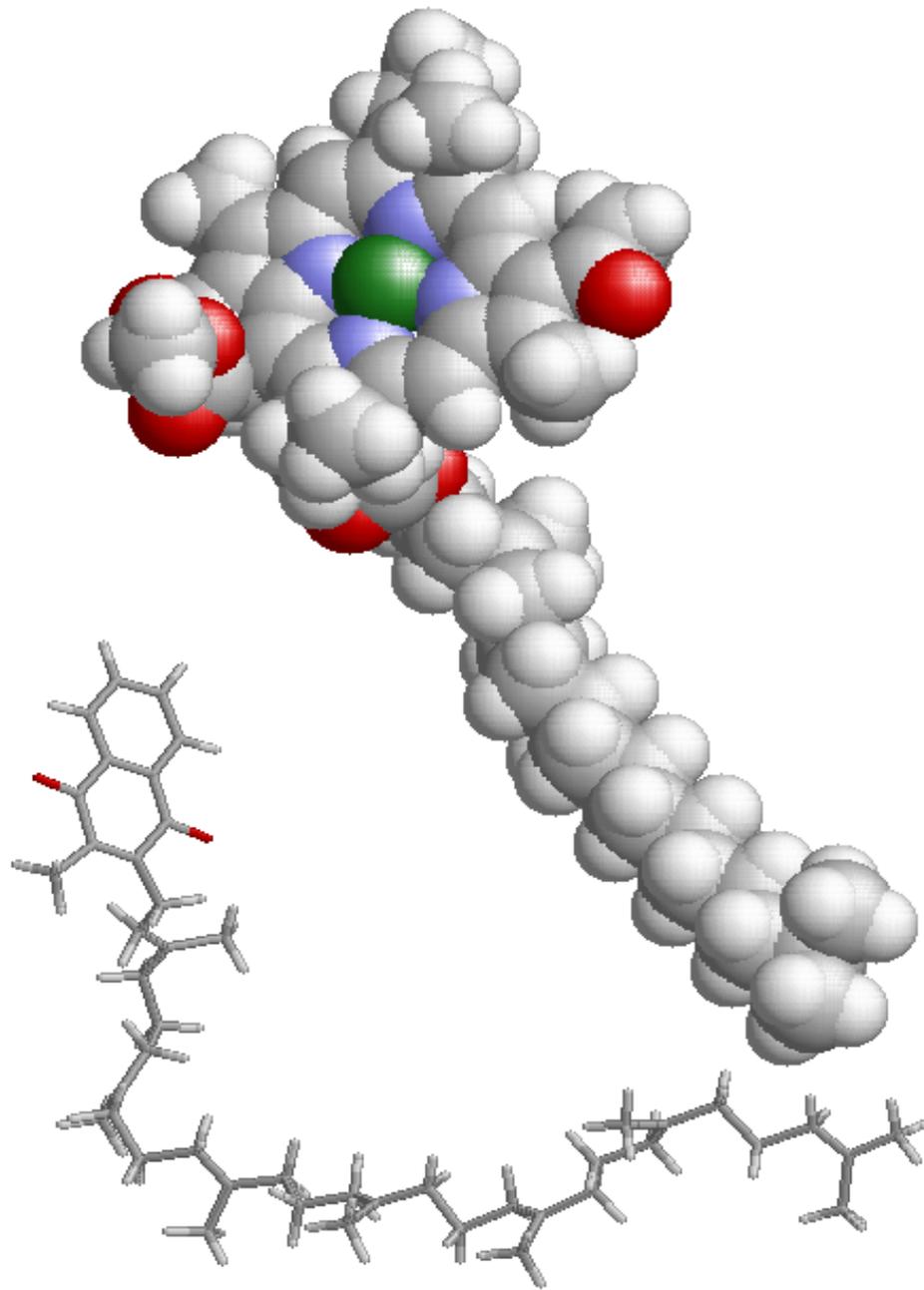


1/1000 光合成

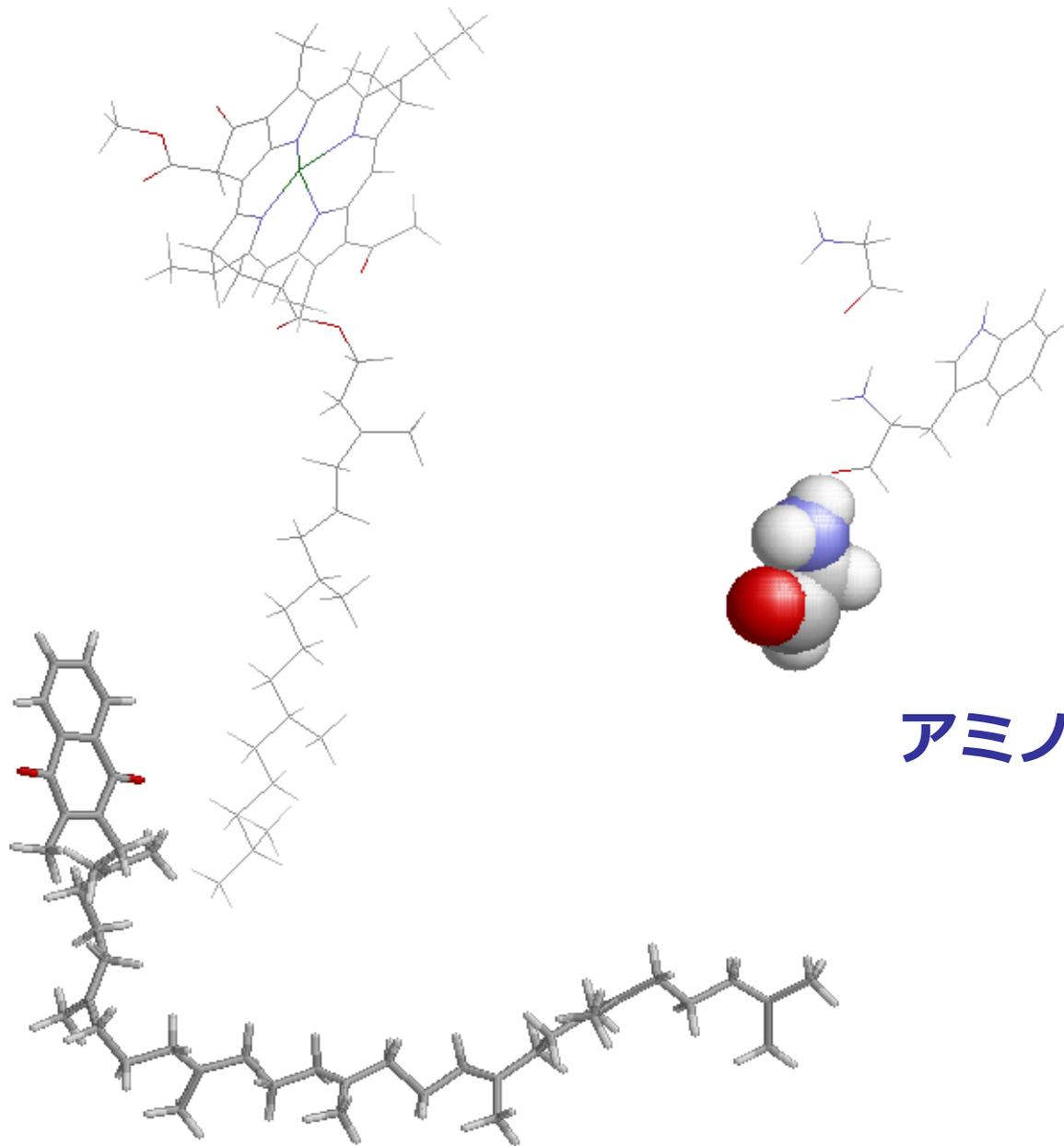


21??
36億年前に?
O₂の誕生!!

酸素 炭素 窒素 Mg



つながるアミノ酸



アミノ酸 → 蛋白質

光合成に働く

色素（クロロフィル）

電子受容体（キノン）

タンパク質

蛋白質と超分子の誕生 :

蛋白質の中の対称性

: LH2 アンテナ色素蛋白質

色素 (クロロフィルとカロテノイド)
と蛋白質の複合体

Photosynthetic Bacterial Cell

TIBS 14 - February 1989

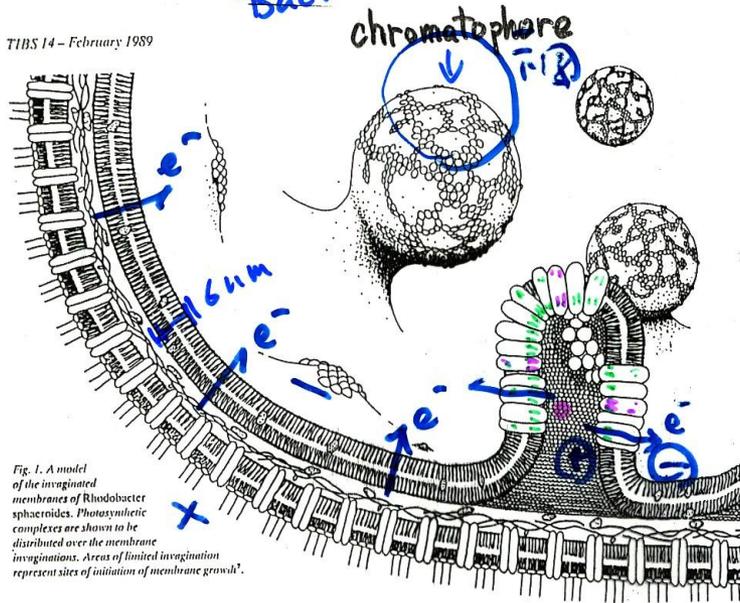


Fig. 1. A model of the invaginated membranes of Rhodospirillum rubrum. Photosynthetic complexes are shown to be distributed over the membrane invaginations. Areas of limited invagination represent sites of initiation of membrane growth.

Crystal structure of an integral membrane light-harvesting complex from photosynthetic bacteria

Antenna

G. McDermott*, S. M. Prince*, A. A. Freer, A. M. Hawthornthwaite-Lawless†, M. Z. Papiz†, R. J. Cogdell† & N. W. Isaacs

*Department of Chemistry and †Division of Biochemistry and Molecular Biology, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK
 DRAL Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington WA4 4AD, UK

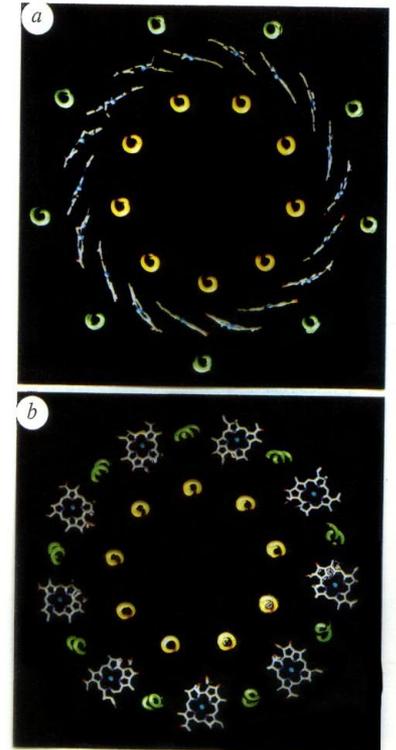
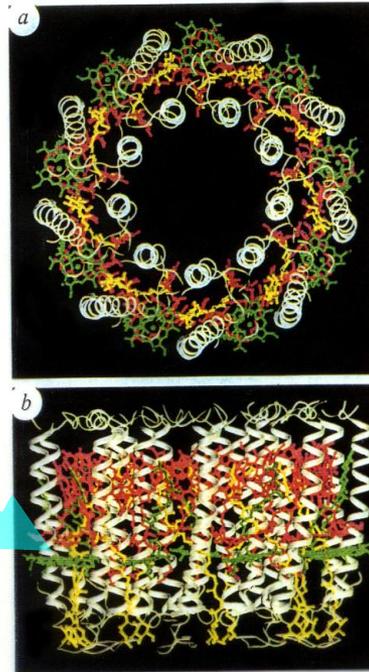
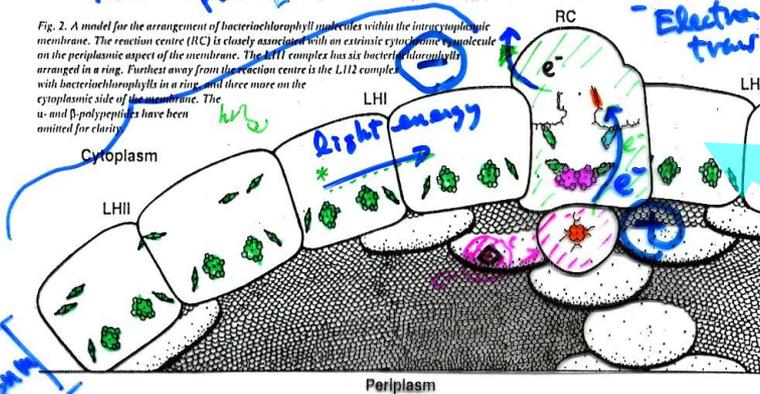
The crystal structure of the light-harvesting antenna complex (LH2) from *Rhodospseudomonas acidophila* strain 10050 shows that the active assembly consists of two concentric cylinders of helical protein subunits which enclose the pigment molecules. Eighteen bacteriochlorophyll a molecules sandwiched between the helices form a continuous overlapping ring, and a further nine are positioned between the outer helices with the bacteriochlorin rings perpendicular to the transmembrane helix axis. There is an elegant intertwining of the bacteriochlorophyll phytyl chains with carotenoid, which spans the complex.

Antenna Proteins LH1, LH2

Reaction Center

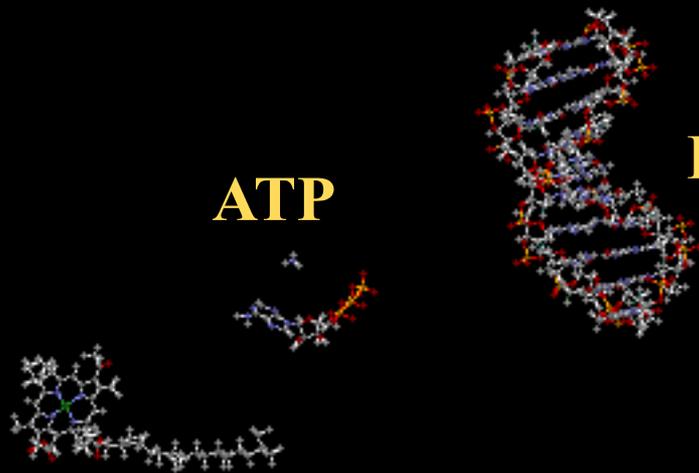
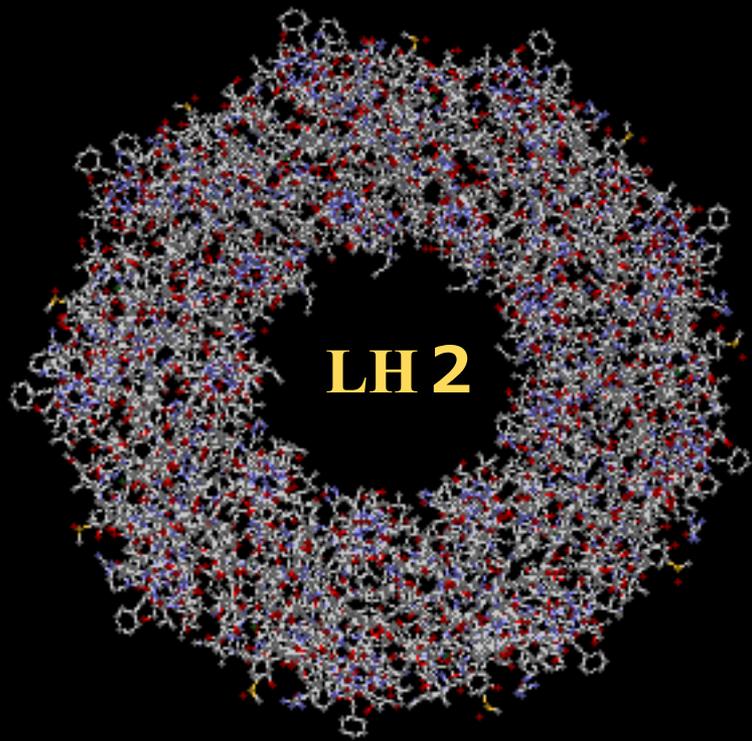
Electron transfer

Fig. 2. A model for the arrangement of bacteriochlorophyll molecules within the intracytoplasmic membrane. The reaction centre (RC) is closely associated with an extrinsic cytochrome c molecule on the periplasmic aspect of the membrane. The LH1 complex has six bacteriochlorophylls arranged in a ring. Furthest away from the reaction centre is the LH2 complex with bacteriochlorophylls in a ring, and three more on the cytoplasmic side of the membrane. The α - and β -polypeptides have been omitted for clarity.



Hunter et al., 1989

LH2



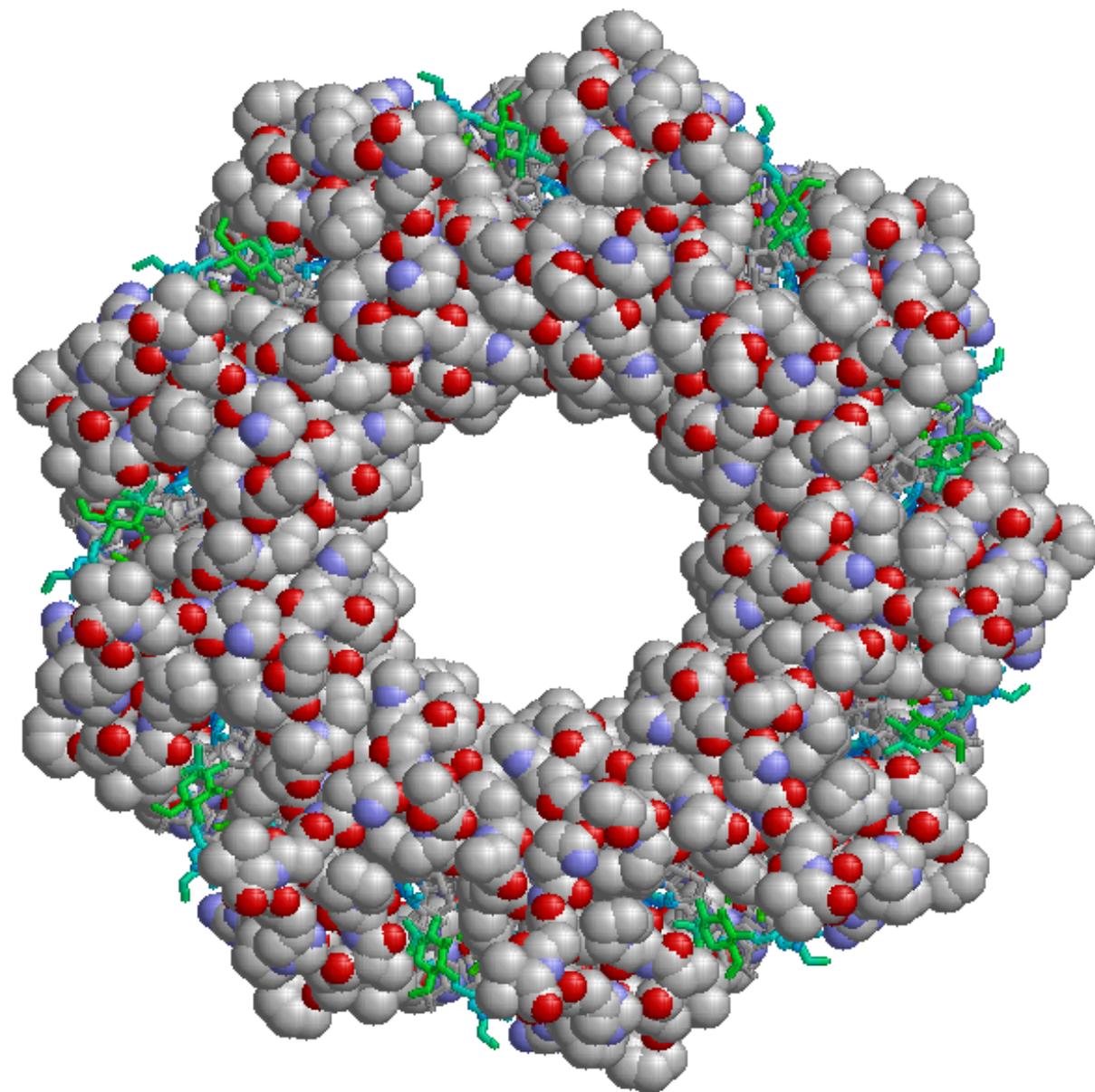
ATP

DNAの一部

クロロフィル

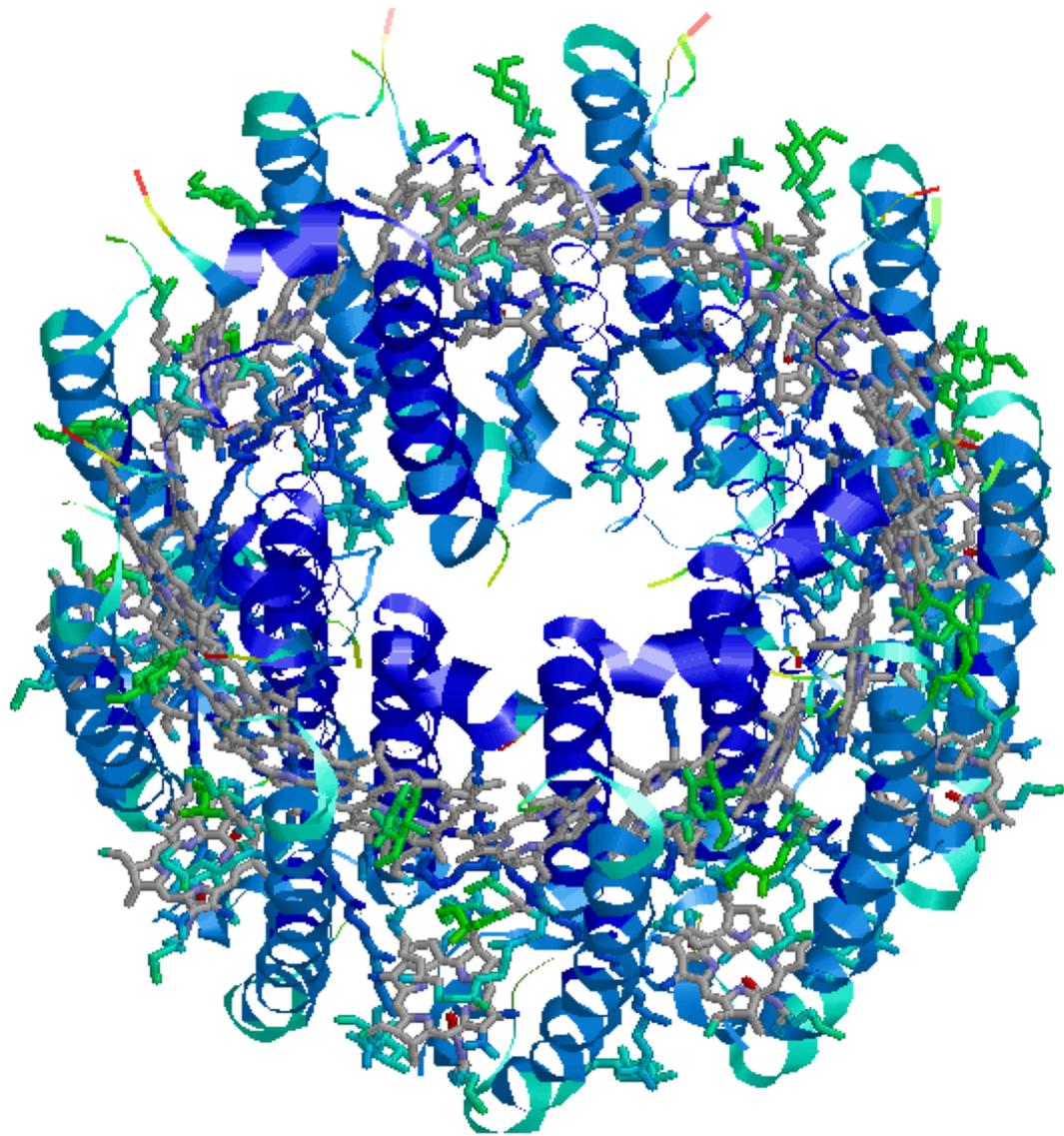
蛋白質部分をSFモデル表示

スペースフィルモデル (色はC P K)

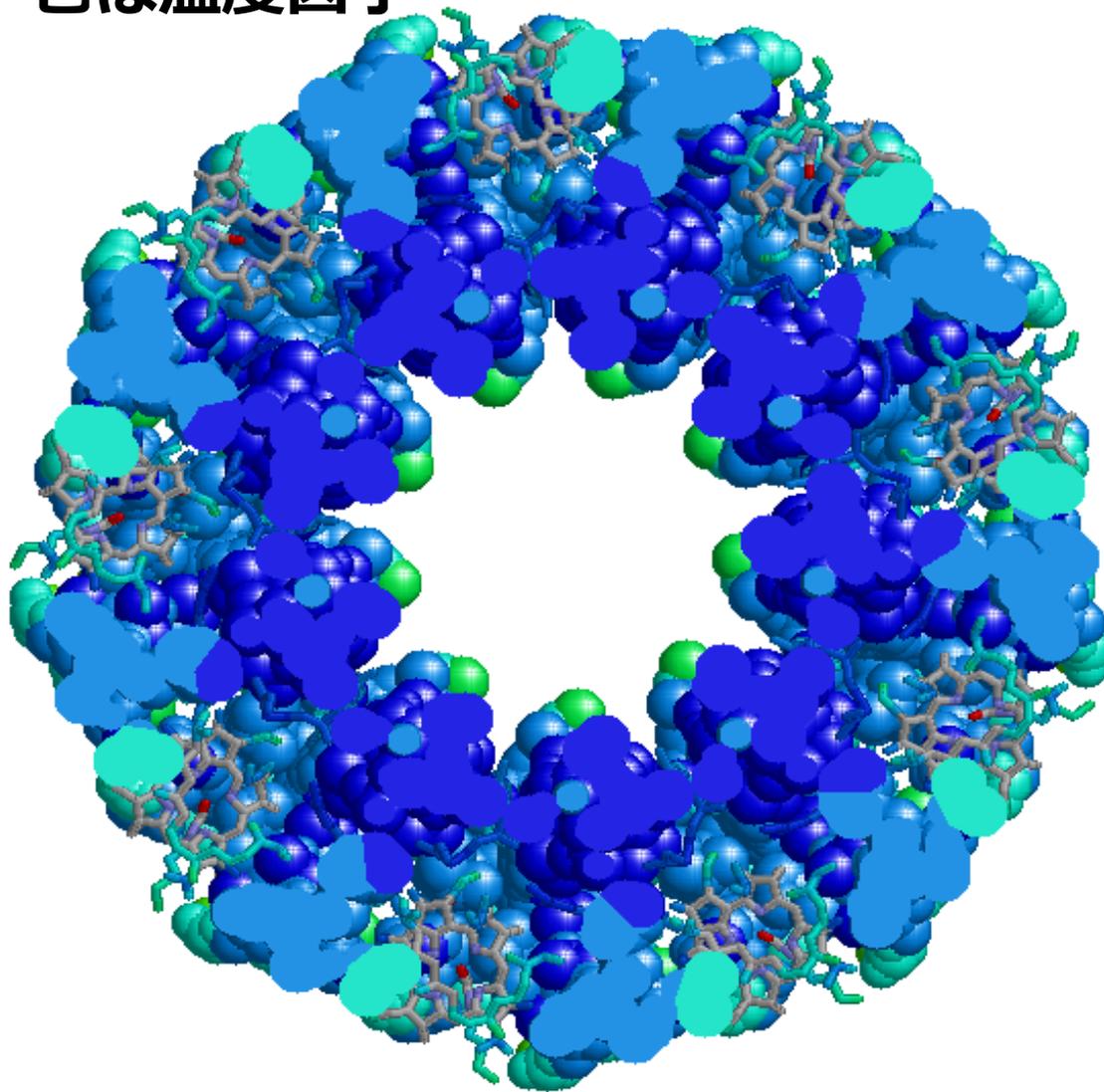


(C P K) 酸素 炭素 窒素 Mg

蛋白質アミノ酸部分だけ
リボンで描く



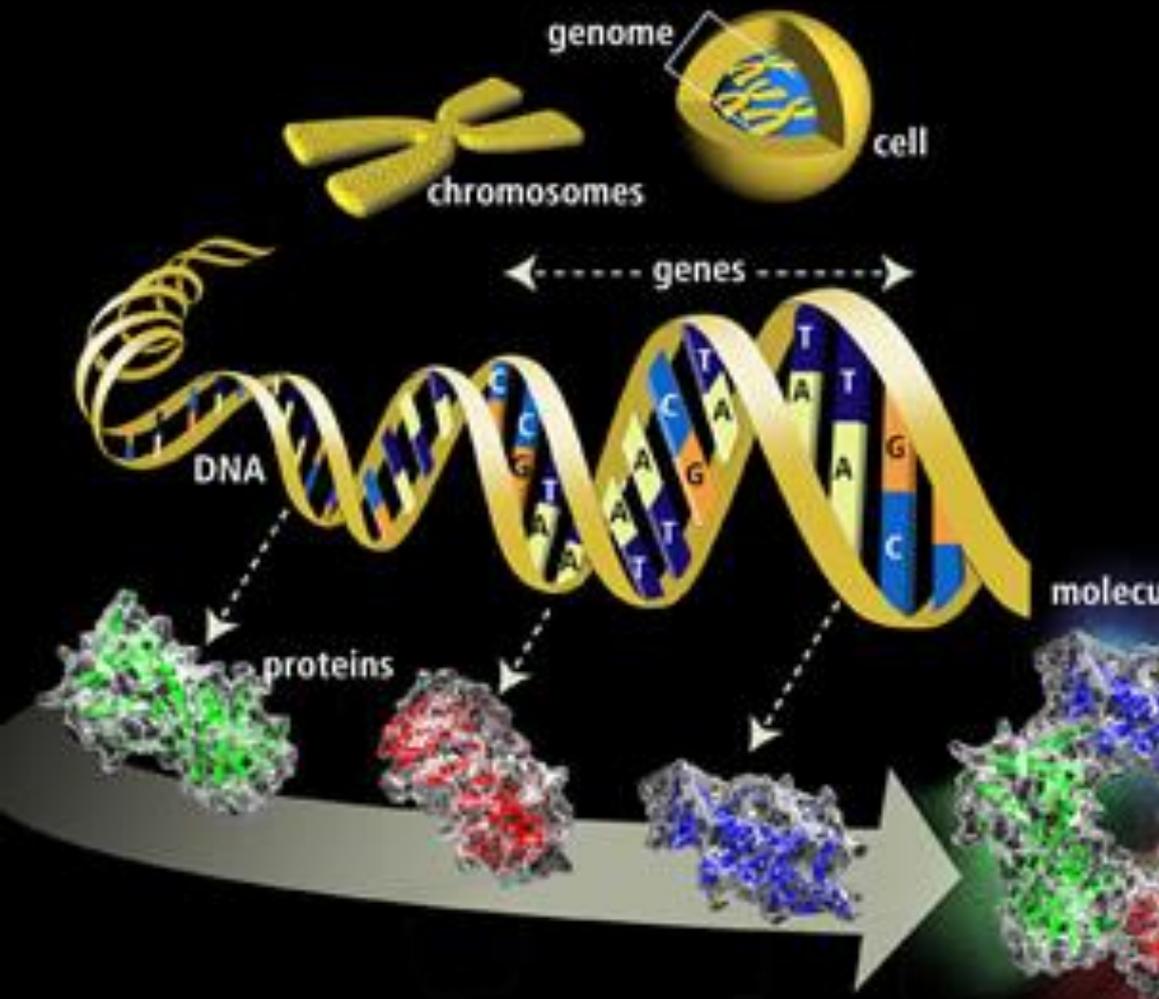
蛋白質をファンデルヴァールス半径（スペースフィルモデル） 断面図、色は温度因子



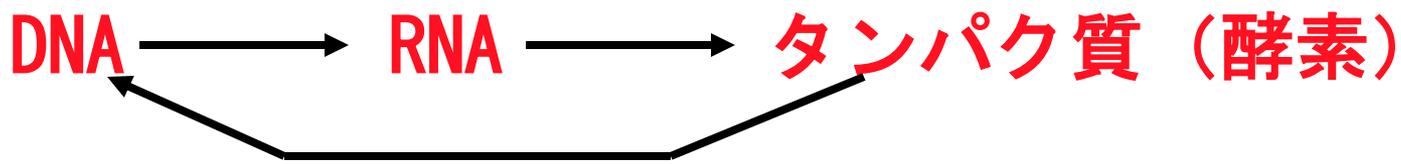
蛋白質ってどんなもの？

たとえば筋肉の主成分

C H O N (S)



クロロフィルなどの
非タンパク質の
遺伝子はない！ 10以
上の酵素が働いて作り
出す。間違える事もある→突然変異



分子や原子は考えない

- 分子は分子を形と力で認識する。
- 働く力は、
 - クーロン力
 - 原子間力 (van der Waals力)
 - 溶媒水のエントロピーの変化
 - 分子内、相互作用、電子や光エネルギー移動は量子力学の世界

9 8 0

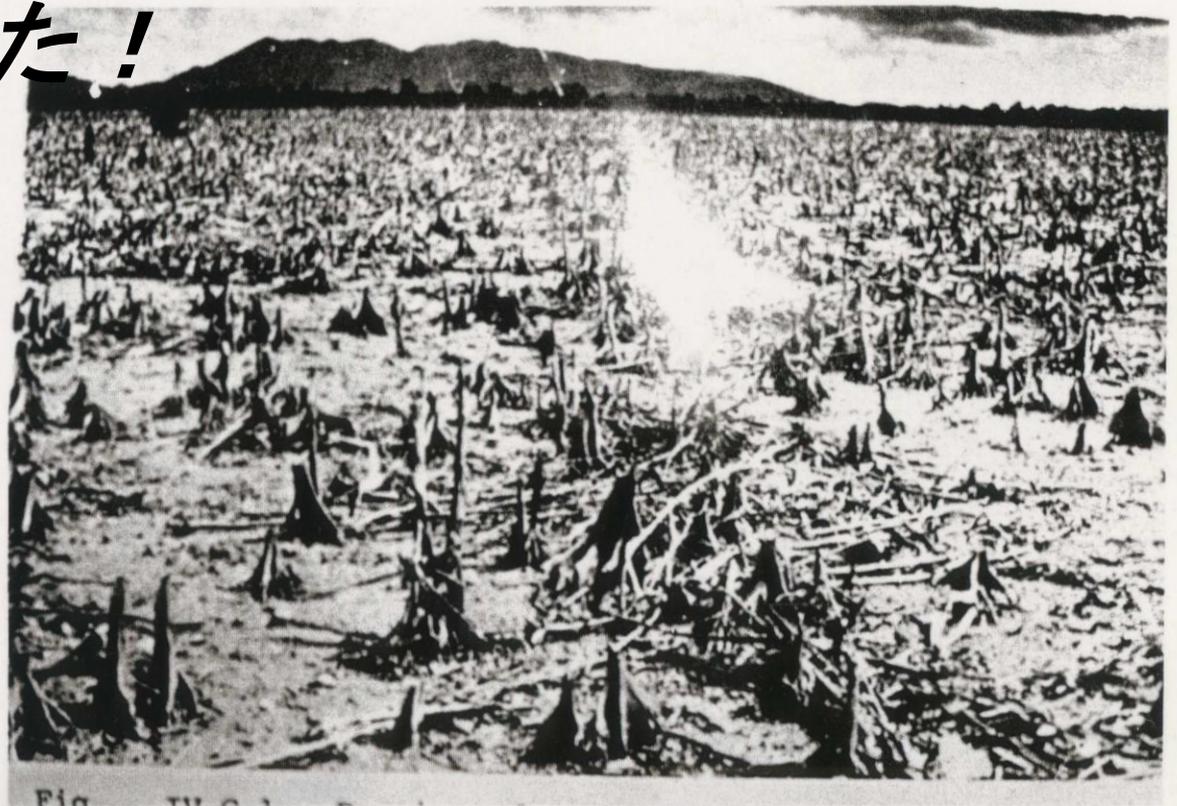
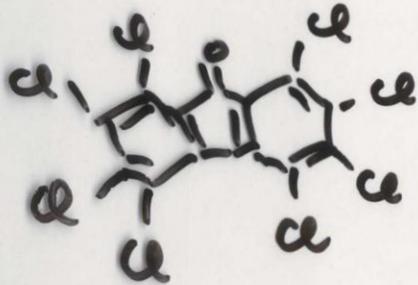


枯れ葉剤＝除草剤： 2

45T：この中の100

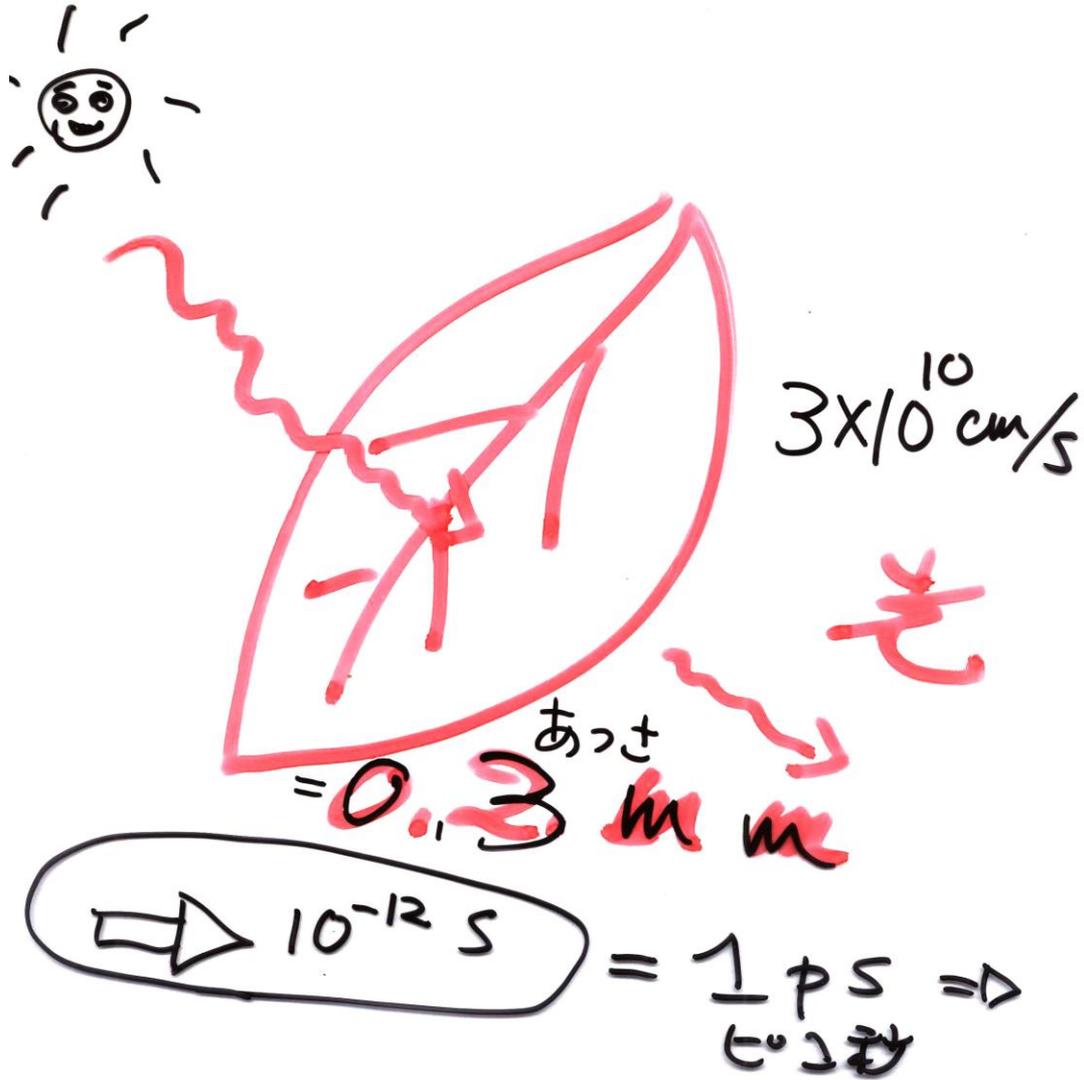
万分の1以下の不純物ダイオキシンがDNAに結合、
まちがえさせた！

Dioxin

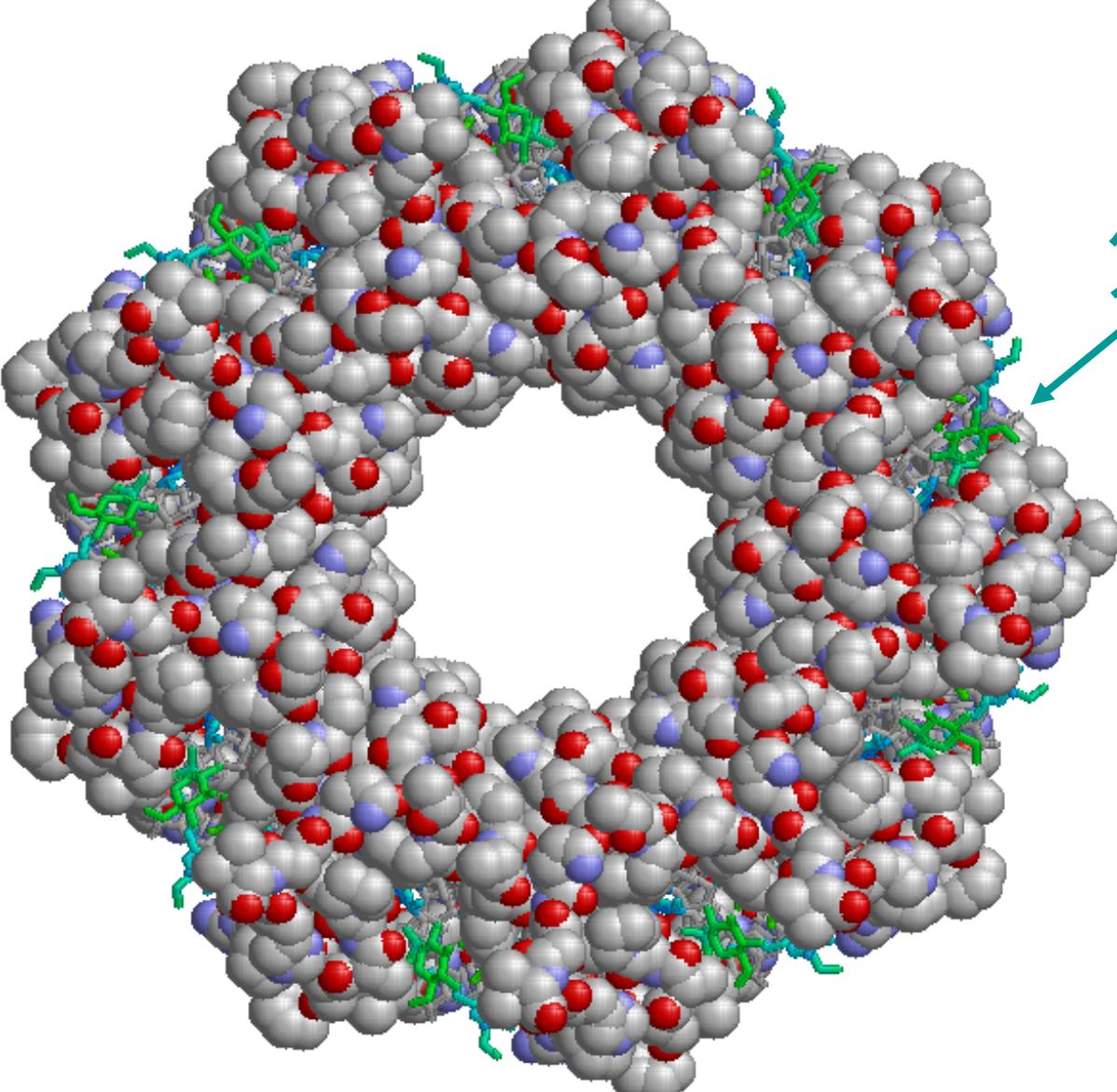


エネルギー移動の機構

光は遅い



紅色光合成細菌のLH2バクテリオクロロフィル-蛋白質



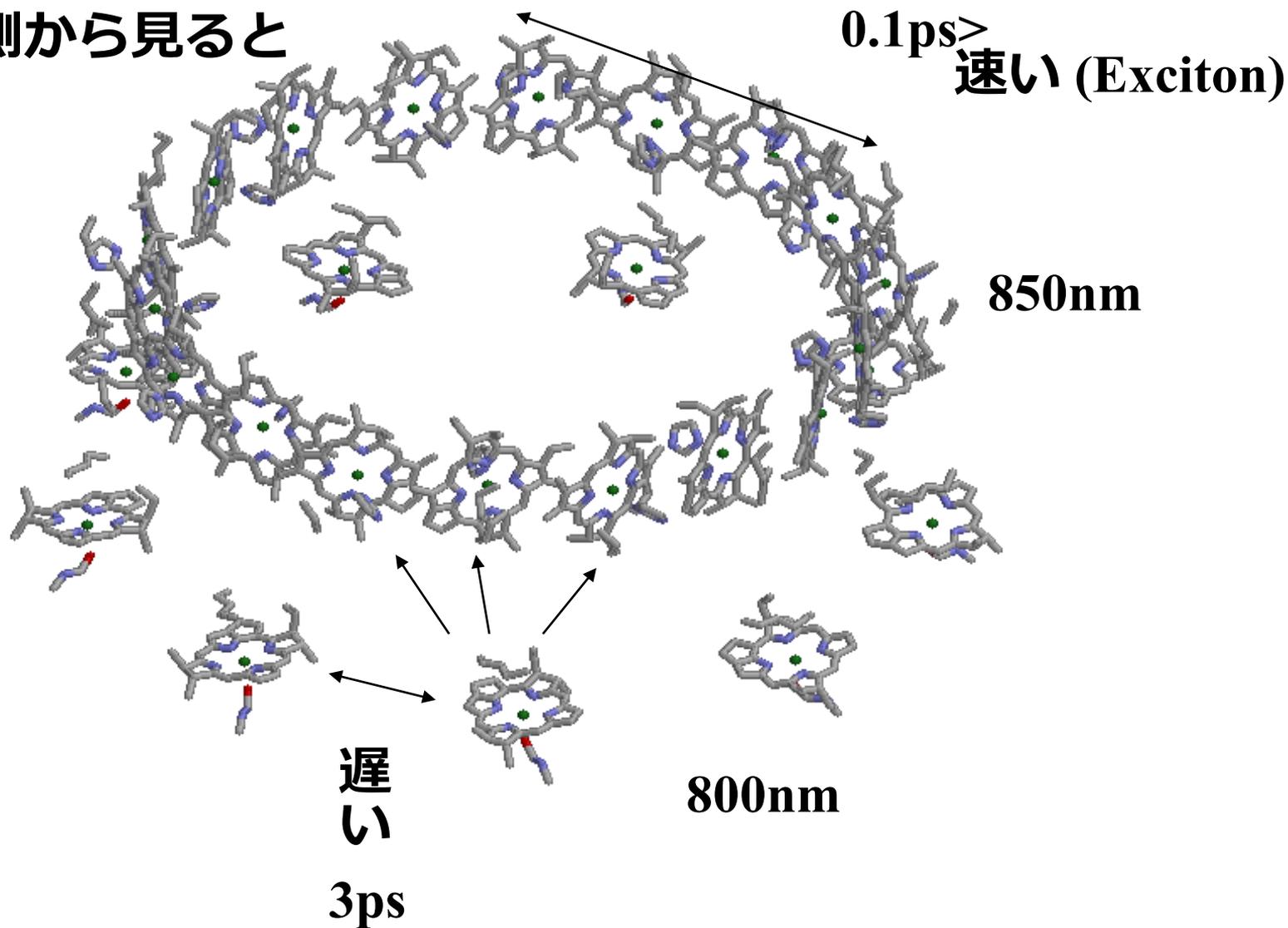
バクテリオ
クロロフィル

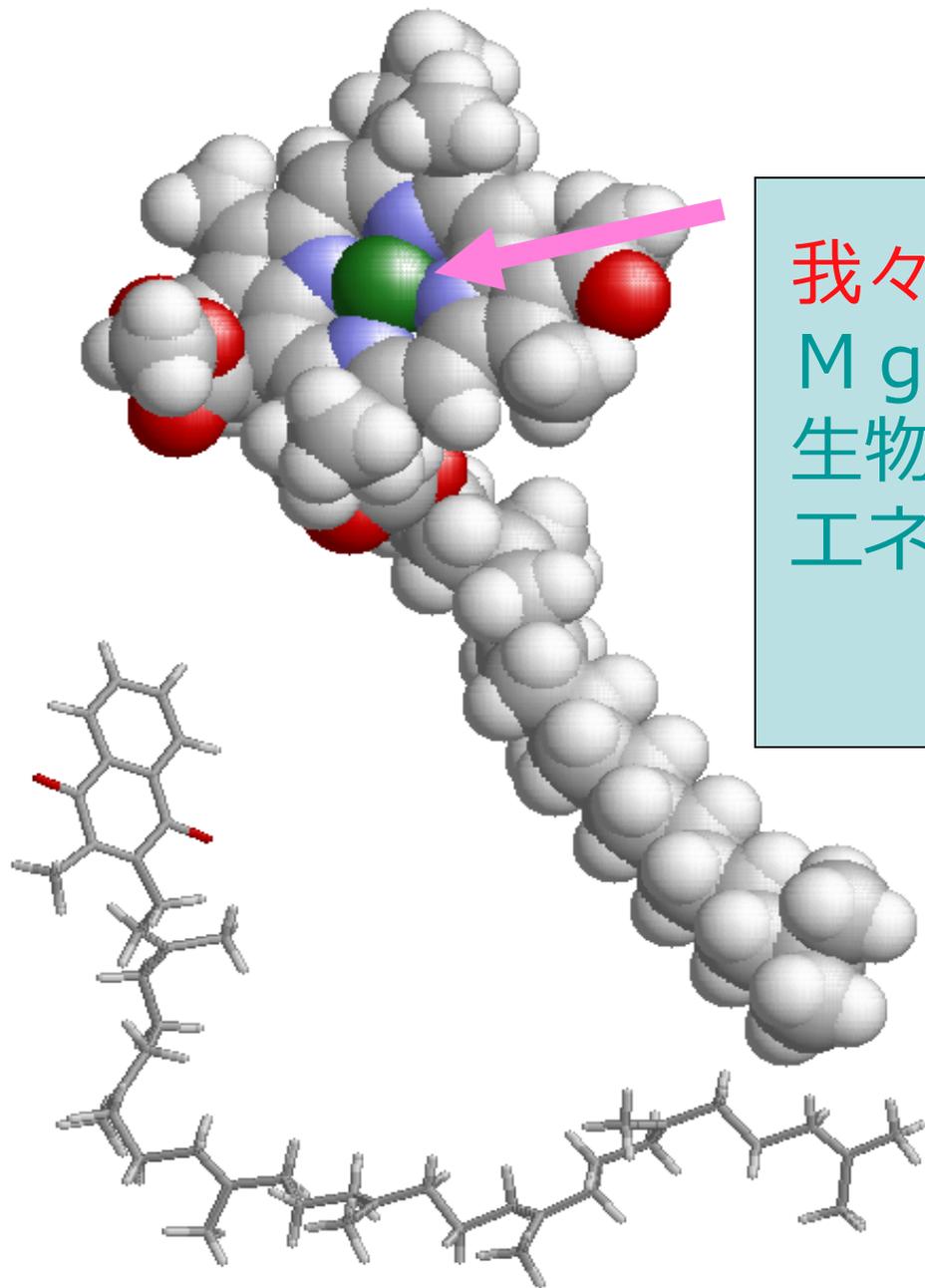
スペースフィルモデル (色はC P K)

酸素 炭素 窒素 Mg

クロロフィル分子間を励起状態がフェムト秒で移動、保存、別の複合体に30psで渡す

膜の横上側から見ると





我々の研究成果

MgをZnに変える

生物の発見、同定

エネルギー移動の実測

どうやって測るの？

ストリークカメラ と

フェムト秒アップコンバー

ジョン法：

フェムト秒レーザで0.1ピコ秒単位
で反応を見る。時間を距離差として
測定

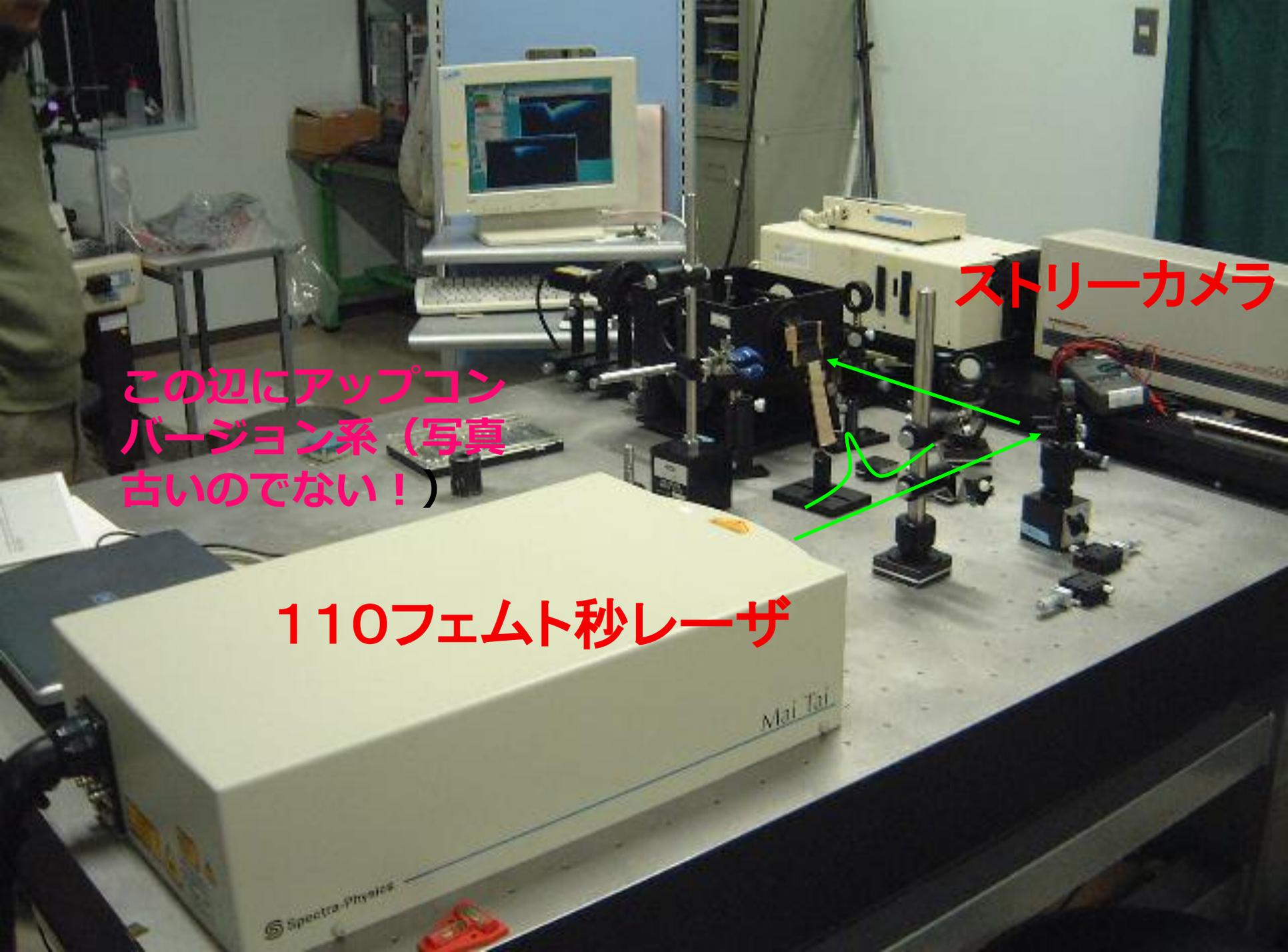
$$1 \text{フェムト秒} = 10^{-15} \text{秒}$$

$$= 1000 \text{兆分の1秒}$$

この辺にアップコンバージョン系（写真古いのでない！）

110フェムト秒レーザ

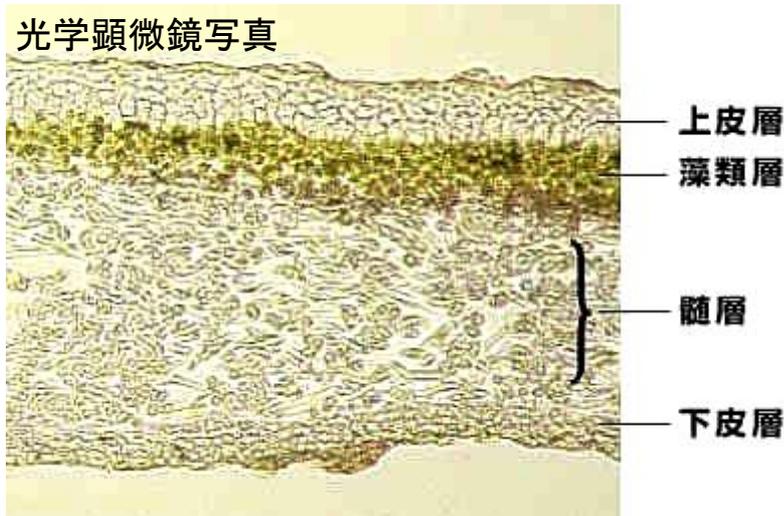
ストリーカメラ



地衣類の乾燥下での光エネルギー散逸機構

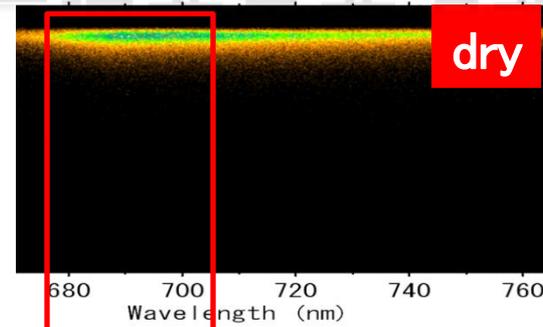
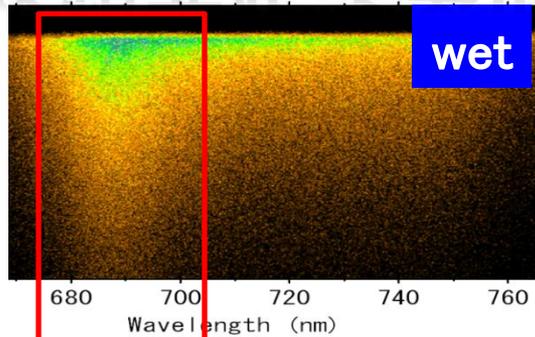
1. 菌類に藻類(緑藻類、シアノバクテリア)が共生した複合生物
2. 共生藻類の光合成で生育
2. 日本に約1600種、世界に2万種存在(種名は菌類に対してつける)
3. 共生藻類については7種ほど知られている
4. 水分保持機構なし(植物は気孔を閉じて乾燥を回避)
→環境変動の影響大
4. 寒冷、乾燥、高山地帯等の極限環境で生存可能
5. 乾燥環境下で光合成は停止
→光化学系の状態は？

光学顕微鏡写真



ストリークカメラ法による蛍光寿命、スペクトル2次元測定 乾燥地衣類光化学系IIの超高速光蛍光消光

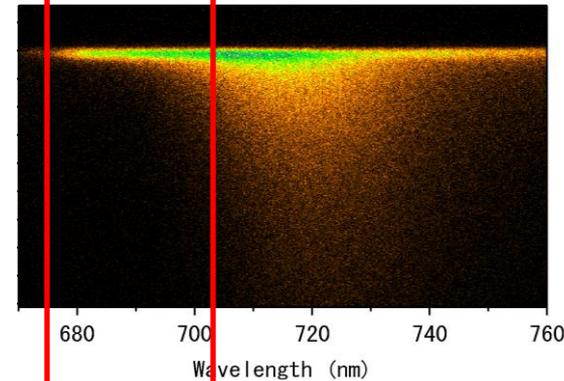
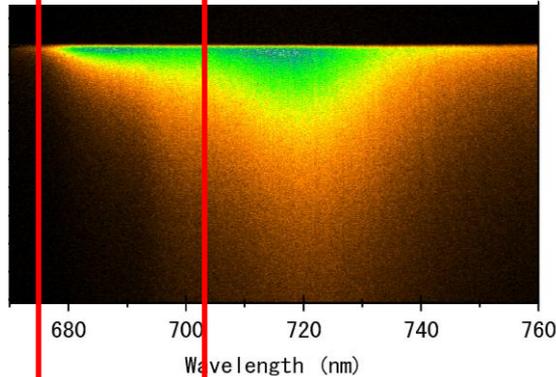
室温



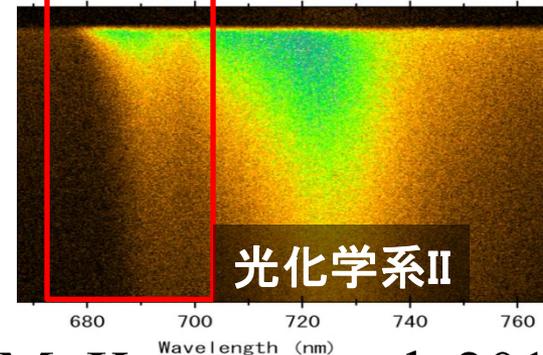
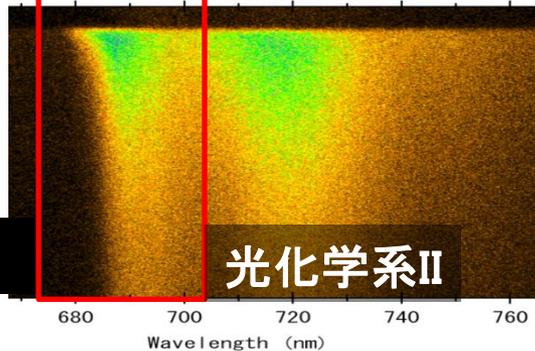
0 ns 縦軸
軸

5 ns

77 K



4 K



ムカデコゴケ

光化学系II

光化学系II

光化学系IIの蛍光は非常に速く減衰
強力な蛍光消光機構をもつ

M. Komura et al. 2010. BBA
蛍光を消光する分子はどこに存在？

光をつかまえる

ちよつと休憩

植物型光化学系 1 反応中心複合体

クロロフィル分子 : 96

カロテノイド:21

フィロキノン:2

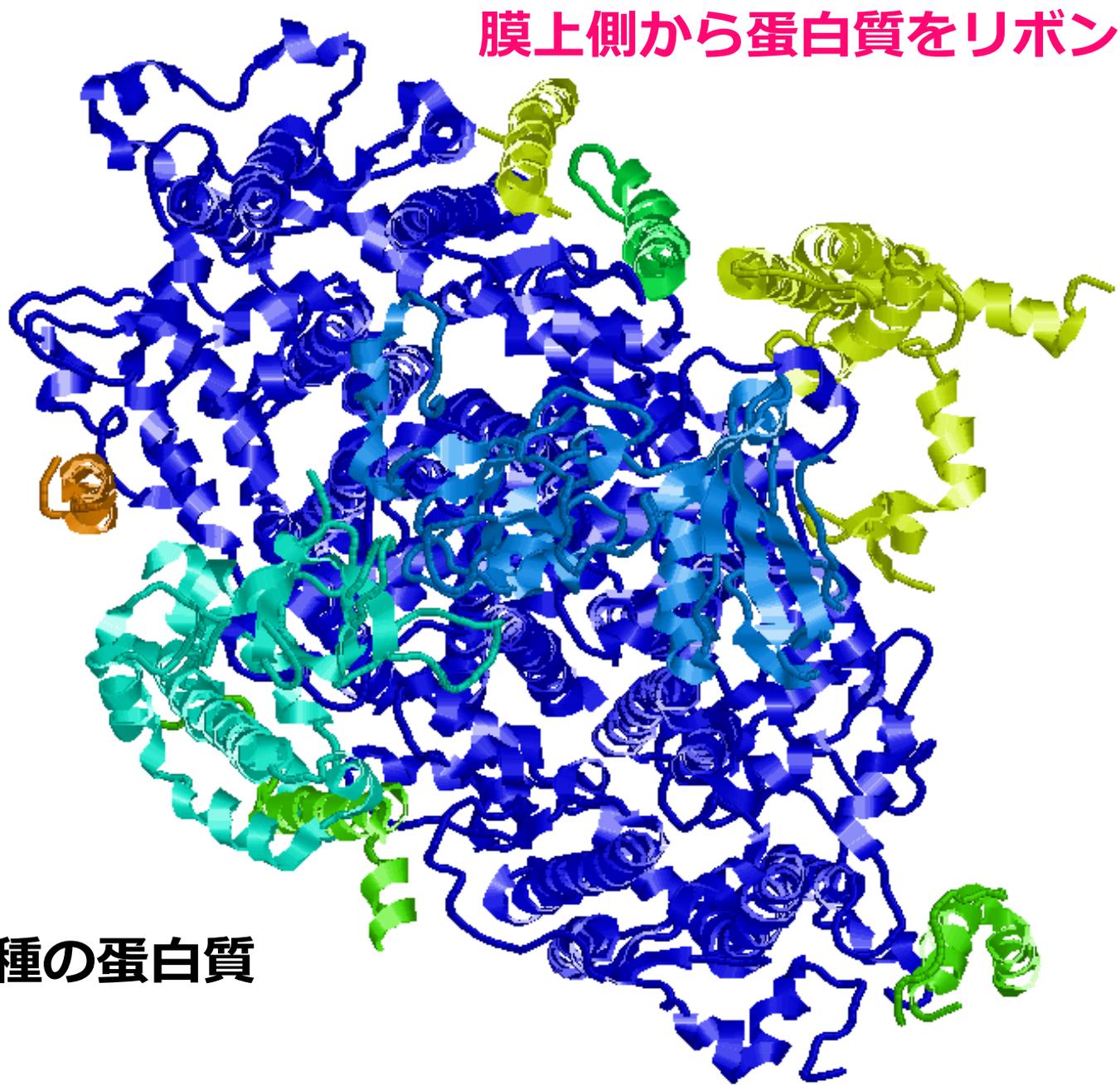
鉄硫黄センター:3

蛋白質:12

脂質 : 3 + 1

(‘01 Jordan et al . Nature)

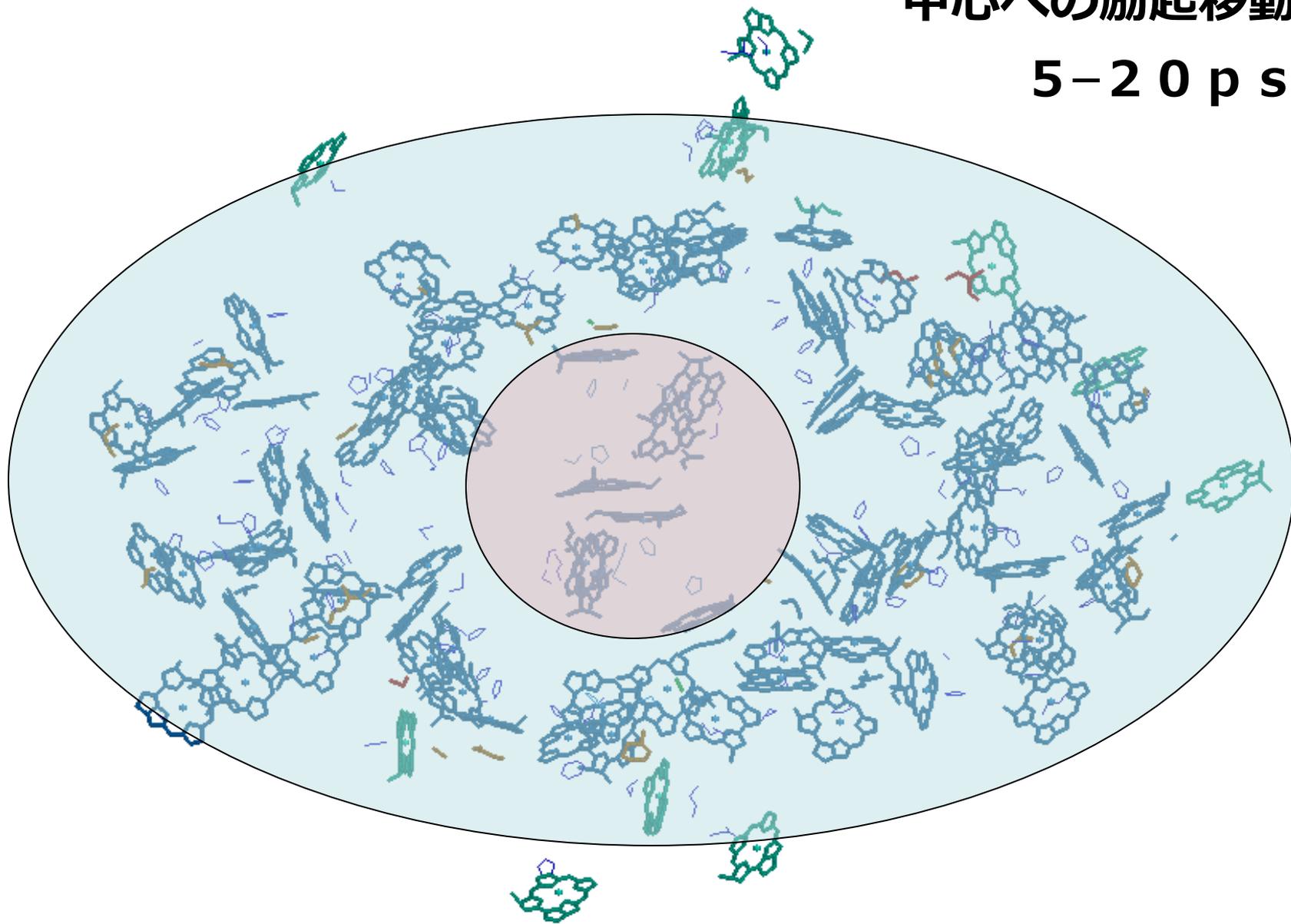
膜上側から蛋白質をリボンでみる



1 2種の蛋白質

中心への励起移動

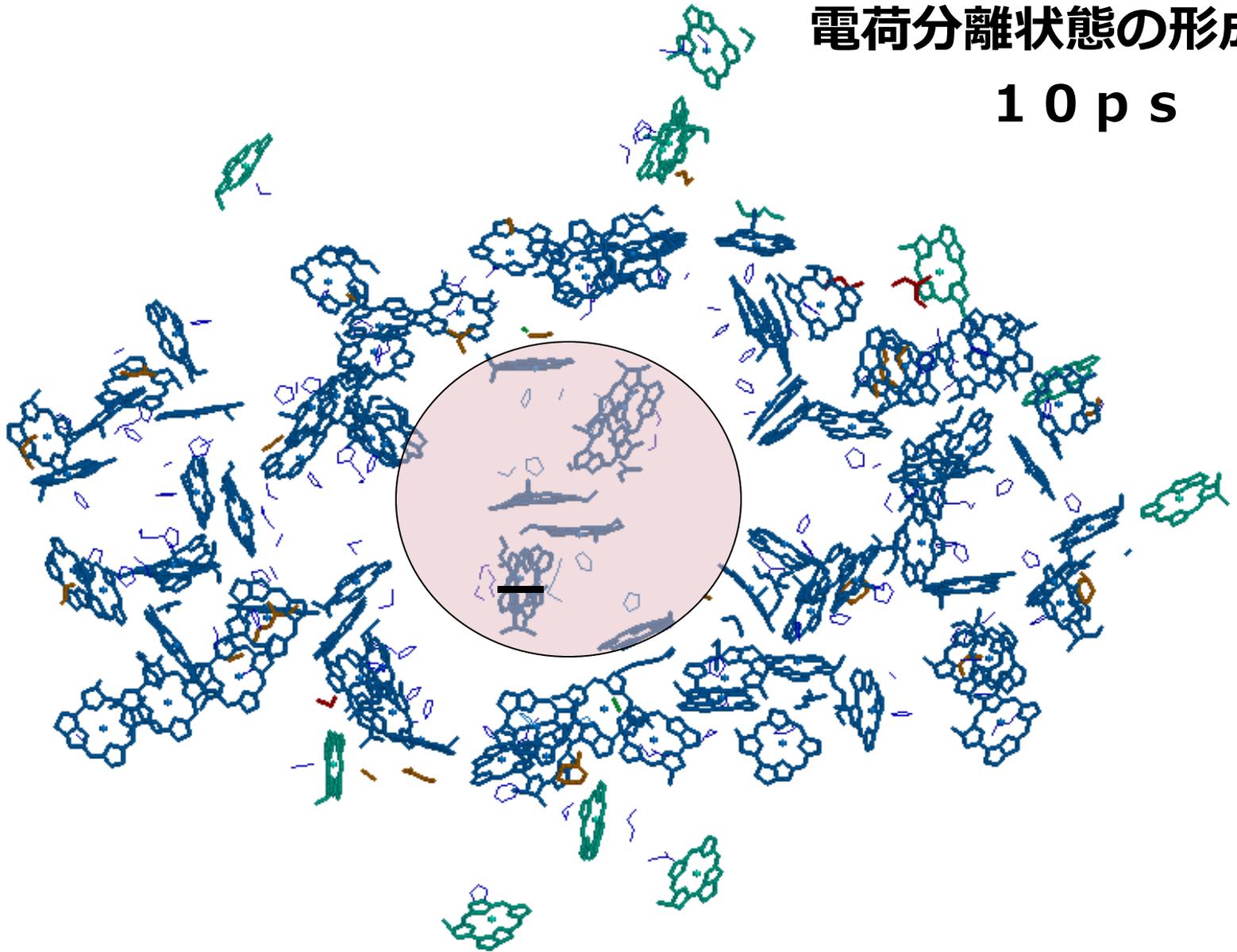
5-20 ps



電荷分離状態の形成

10 ps

+

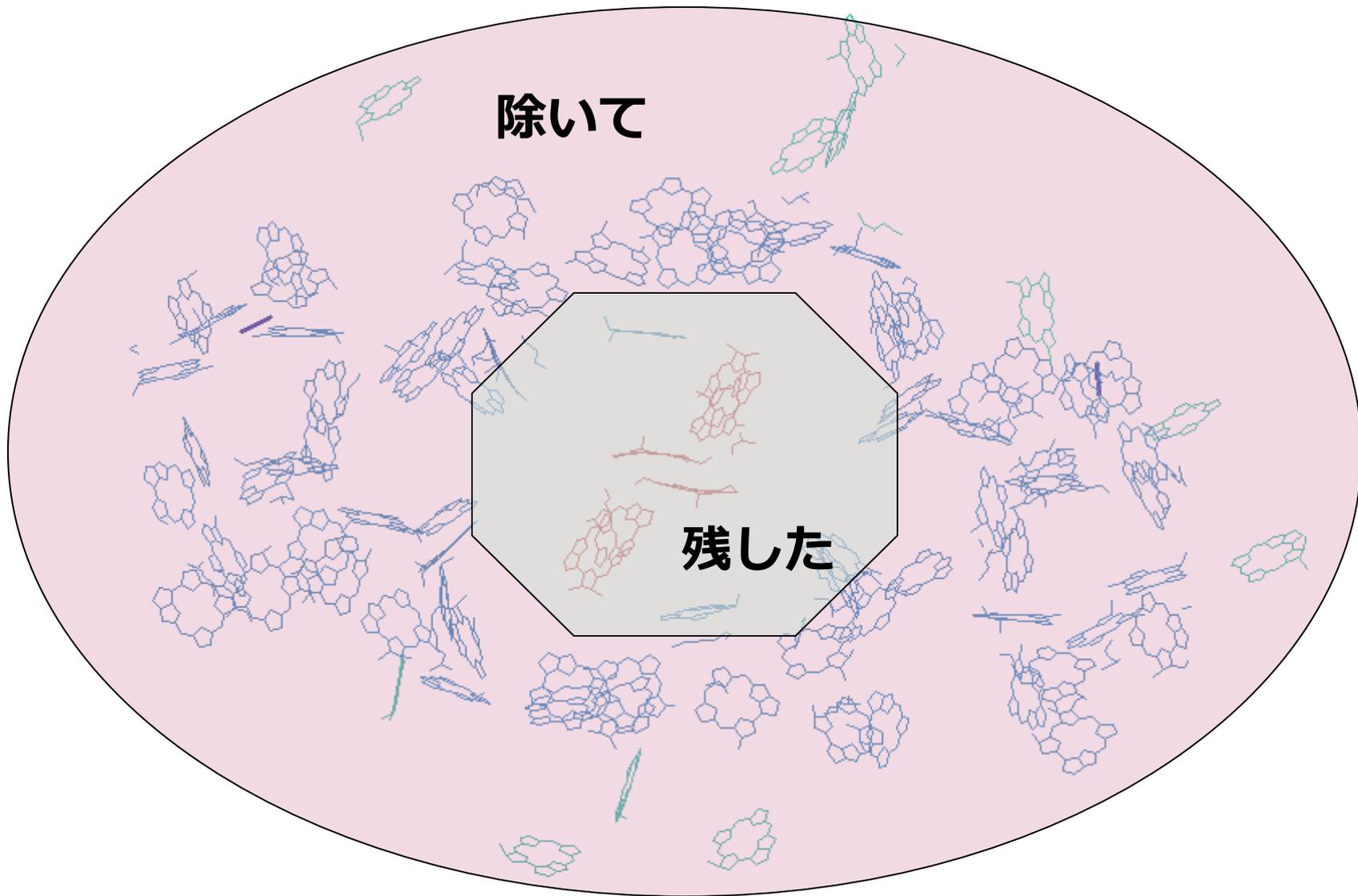


電子が蛋白質の中を動く

新しい実験系の誕生！

除いて

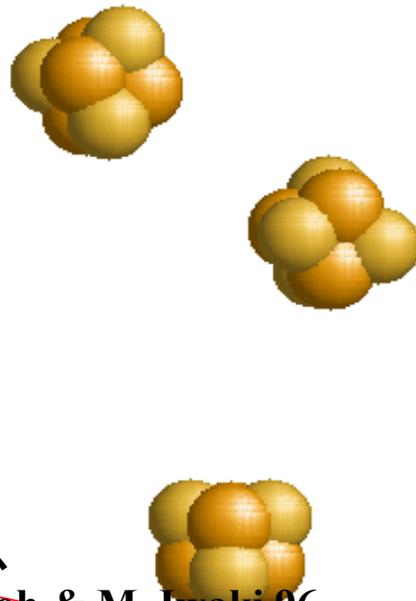
残した



レーザ分光

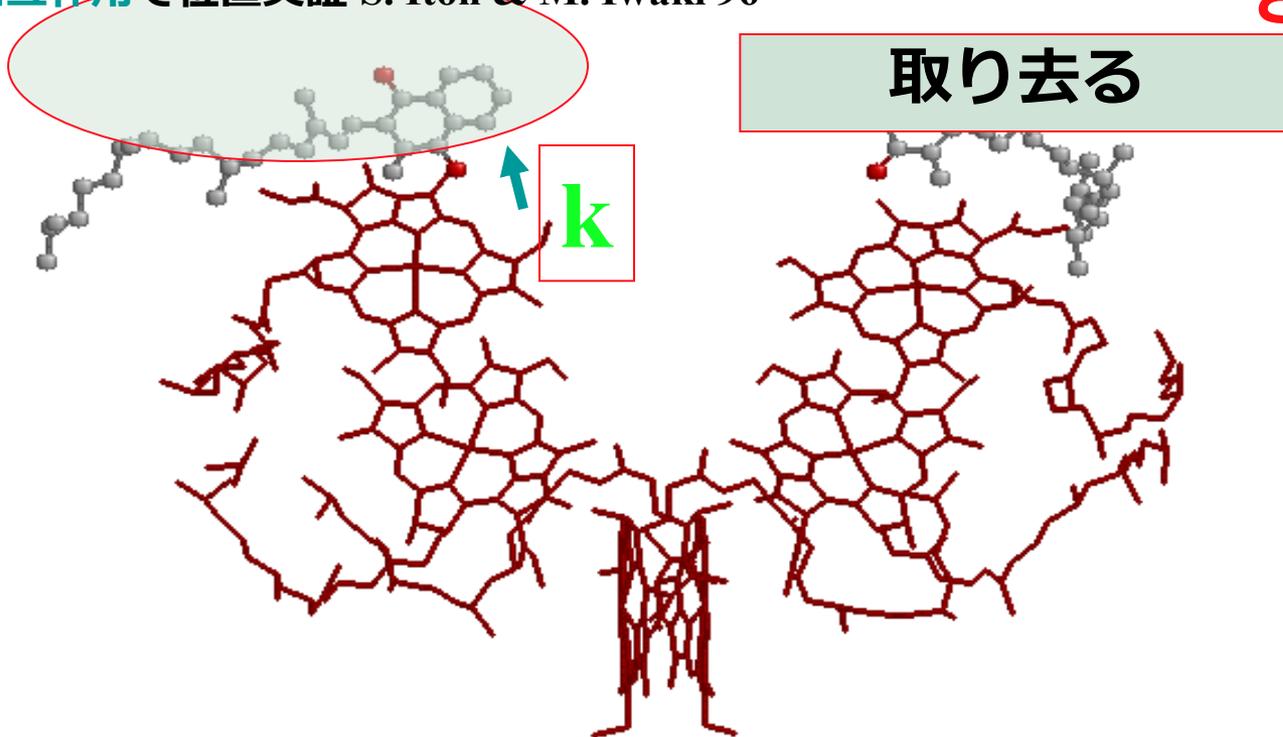
k: 23ps から 30ns
で変化

90以上の人工キノンと入れ替え、
スピン相互作用で位置実証 S. Itoh & M. Iwaki 96



ΔG と原子再配置エネルギー
 λ がみごとに一致

距離だけでなく
原子環境も最適化
されていた



2 タイプの光合成反応中心

絶縁体の中を電子がながれる
半導体との比較

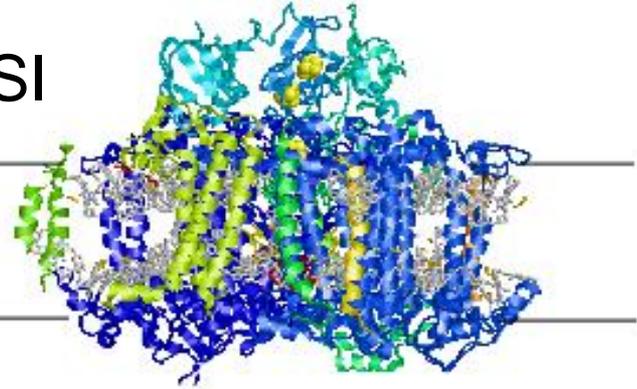
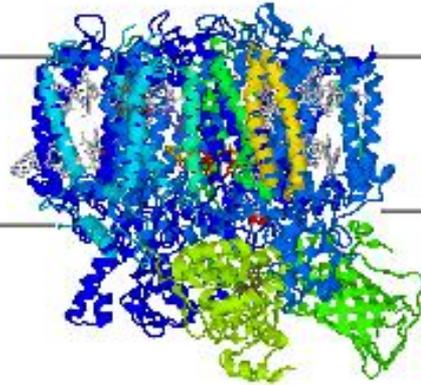
光化学系 II 反応中心
全体構造とタンパク質

光化学系 I 反応中心

PSI

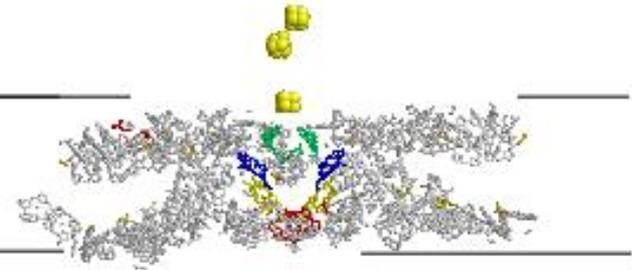
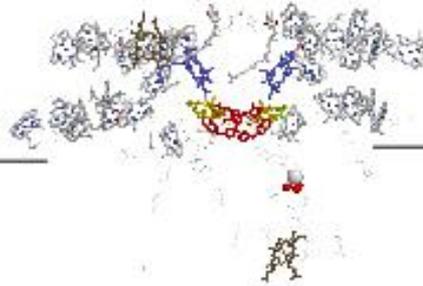
PS II

Proteins
different



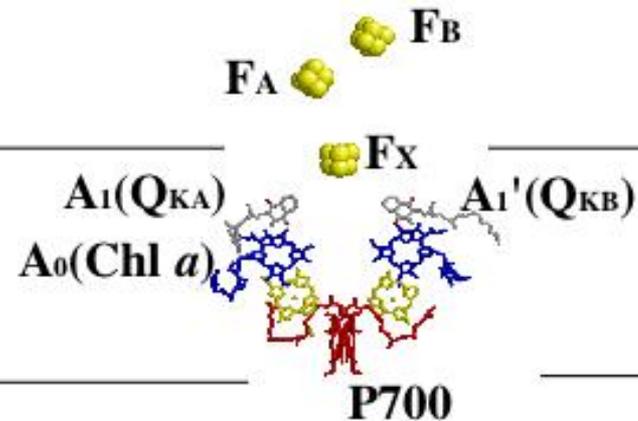
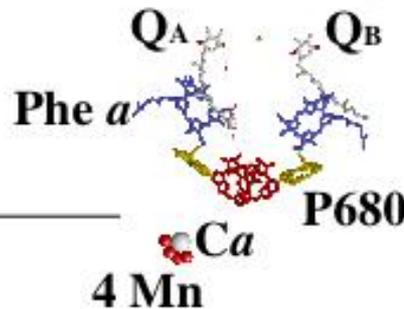
Chlorophyll
contents,
arrangement
different

クロロフィルの配置



El. Transfer
cofactors
similar ?

中核部分の電子移動系

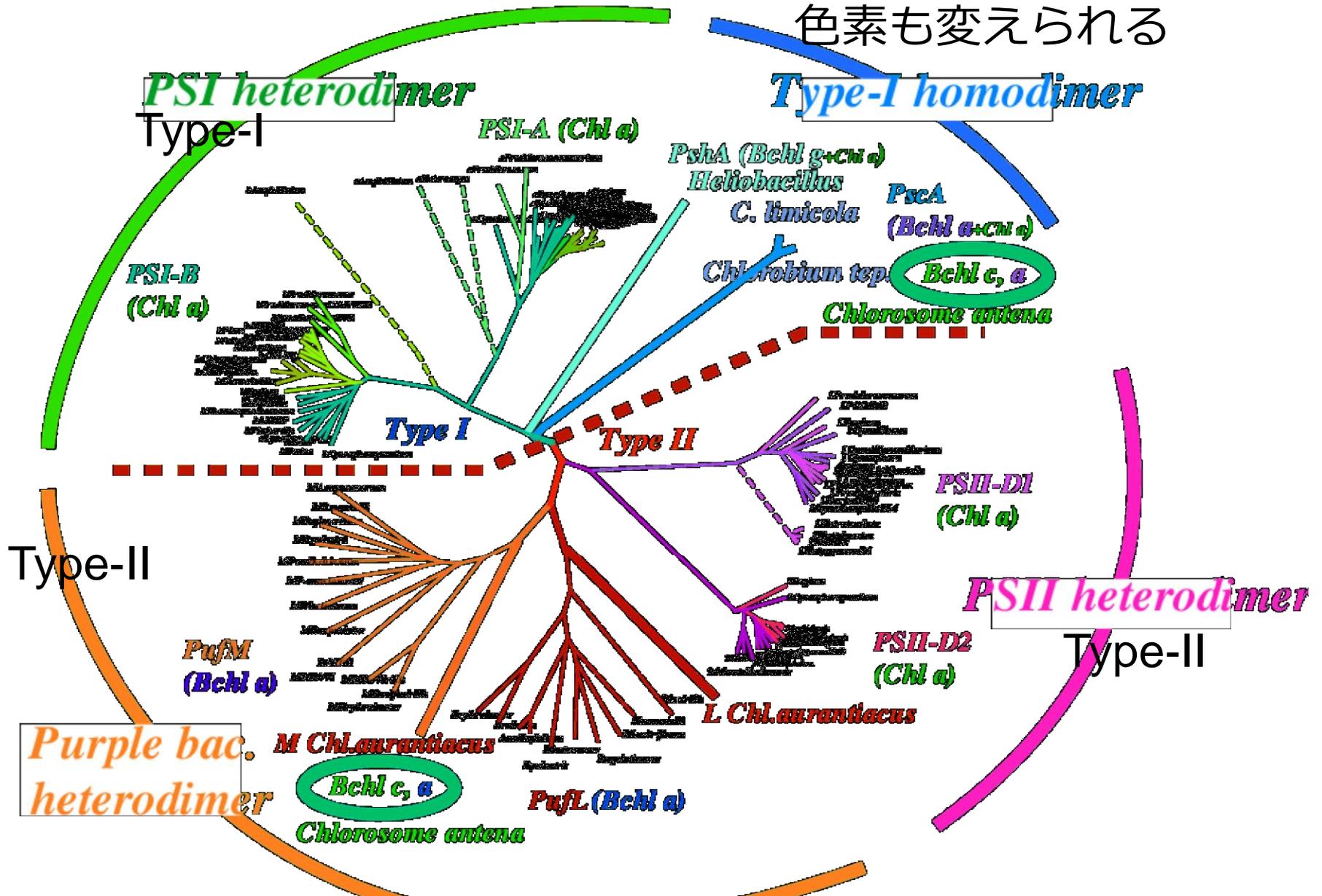


想像を超える多様性
タンパク質が部品の機能を決
める

Phylogeny of RC proteins

タンパク質は変化しても
おなじような機能、

色素も変えられる



光の色（波長）

光合成では可視～近赤外光のみを
つかう

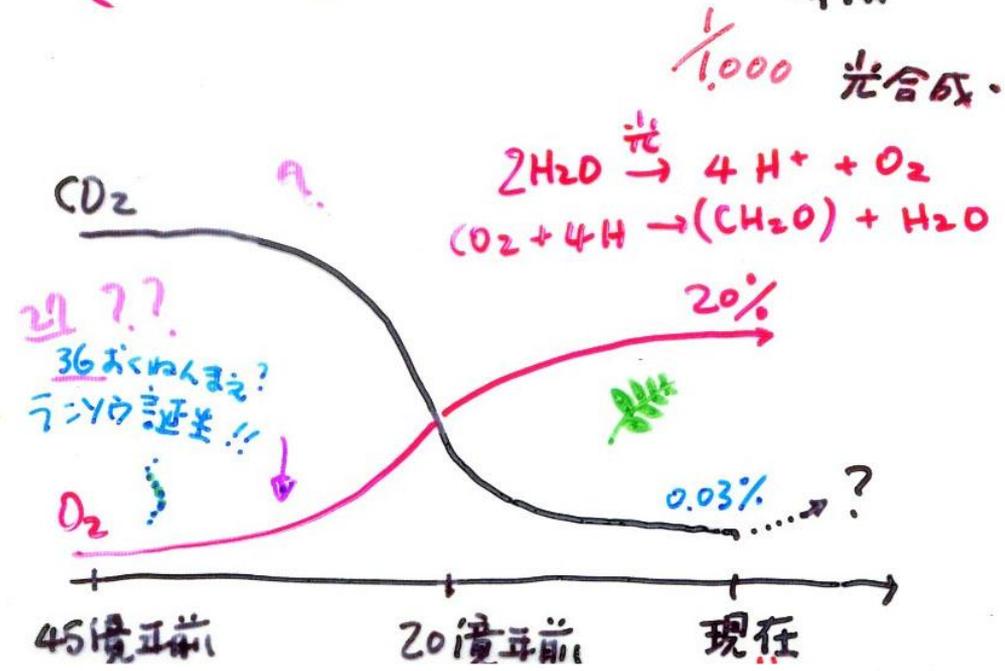
光は太陽からくる

紫外線、X線など
多くの光は地表に
到達しない

可視光を利用する
と、

分子は壊れず、

2つ分以上のエネル
ギーや還元力を
ためると分子を改
造できる



生物の光反応タンパク質内で働く色素分子

生物は、様々な色素と、その光反応を利用する。

機能

光合成

光センサー

分子構造

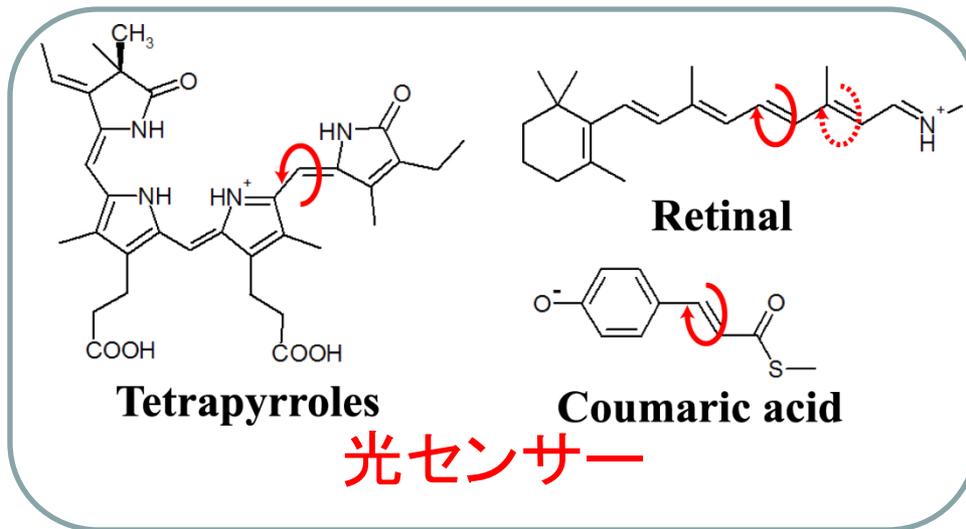
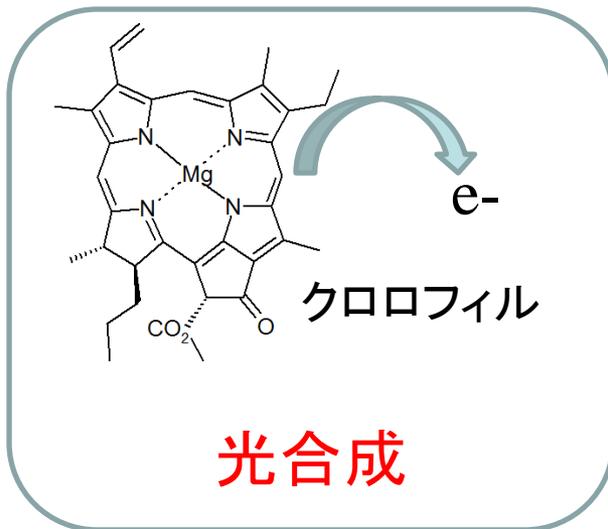
平面状

直鎖状

反応

電子移動 (酸化還元)

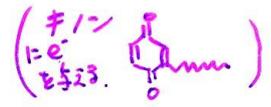
異性化 (構造変化)



Chlorophylls used in Photosynthesis

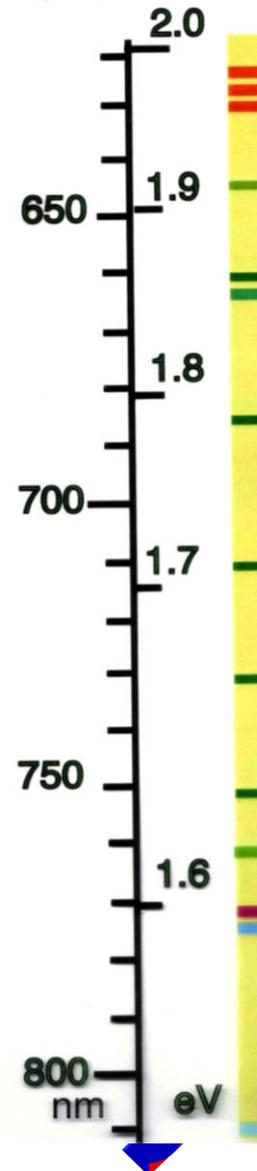
(S. Itoh 2001)

エネルギー (1)
色素



Abs. peak in org. solvent

Chlorophylls (RC, LH) Ring type Photosyn type



植物シアノ型

Porphyrins

Chlorins

Bacteriochlorins

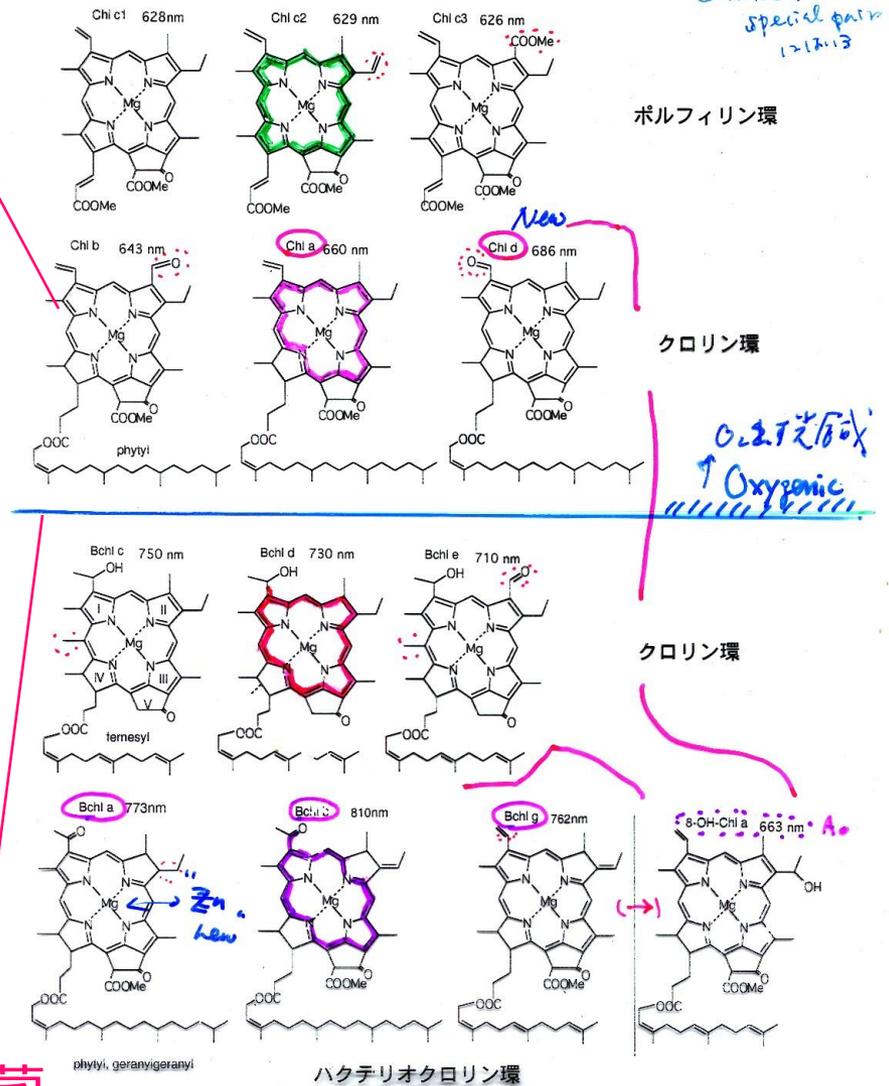
Oxygenic

Anoxygenic

光反応

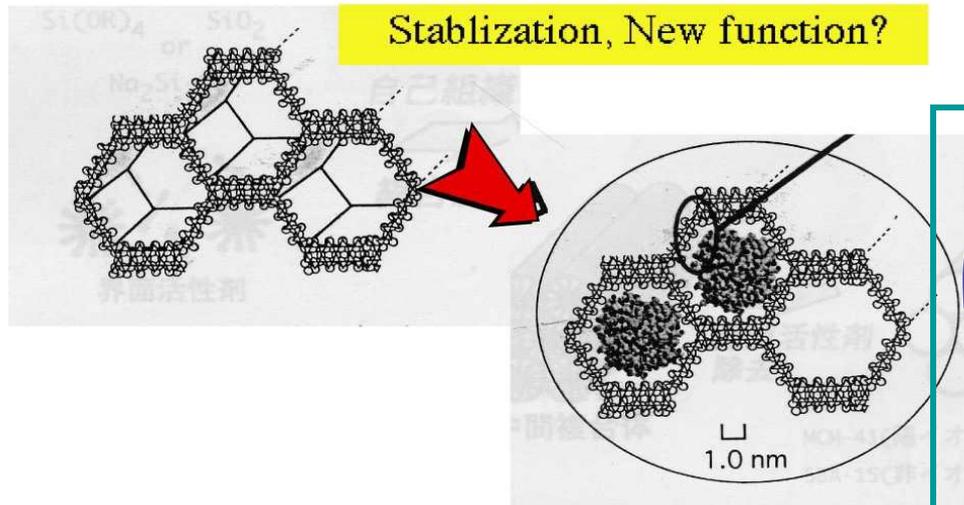
光合成細菌 酸素ださない

Chl c3
Chl c1
Chl c2
Chl b
Chl a
8-OH-Chl a
Chl d
in *A. marina*
BChl e
BChl d
BChl c
BChl g
Zn-BChl a
BChl a
BChl b

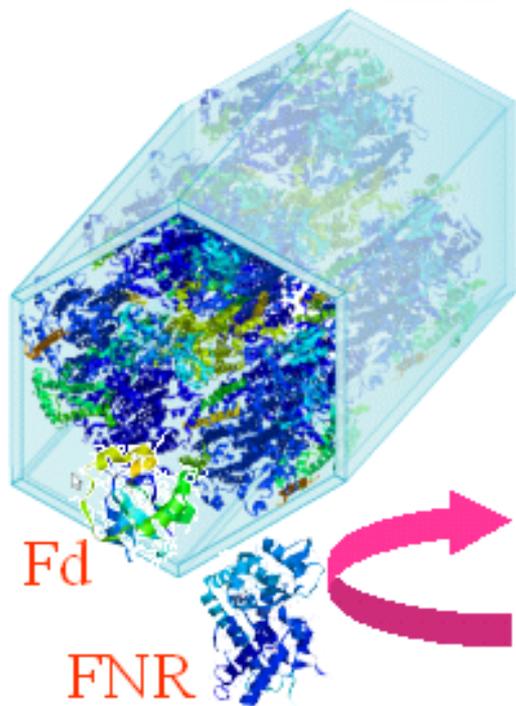


天然にない反応系をつくる

Introduction of proteins into FSM



シリカのナノ構造中に光合成タンパク質をいれて安定化する



NADPH
NADP⁺

PS II in SBA

H⁺, O₂
H₂O

まとめ

ほぼ全クロロフィル種の2系統の光合成反応中心複合体の電子移動とエネルギー移動を測定し、機構を検討した。

どの系も極めて最適化されていた。まだわからない事も多い。

タンパク質内部で分子の相対配置、タンパク質との相互作用が、波動関数の重なり、エネルギーレベルの調節を特異的にしている。各論が重要。まだ完全な設計はできない。

しかし、多様な光合成系が存在し、各々特異的に最適化されている。タンパク質も色素も変え得る。

相互作用をうまく使い、高い自由度（何通りもの解）が最適化を可能にしている、生存には重要。