

## 第85回アブダクション研究会開催のご案内

### アブダクション研究会

世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail : [jrfd117@ybb.ne.jp](mailto:jrfd117@ybb.ne.jp)

事務局 岩下 幸功

TEL& FAX 042-35-3810

E-mail : [yiwashita@syncreate.jp](mailto:yiwashita@syncreate.jp)

第85回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第84回アブダクション研究会のご報告をします。

◆12・5・26(土)に開催致しました、前回の第84回アブダクション研究会は、大河原 敏男 氏に『生体の熱力学と光合成』というテーマで、解説発表をしていただき、懇親会も含めて、大変に有意義で活発な質疑がなされ、実りの多い対話と交流が出来ました。ご発表者のご出席の皆様から心から感謝とお礼を申し上げます。

◆発表の内容は、— 1. 熱力学で生命現象を捉える 2. 光合成から生命現象を捉える 3. 生体が維持するホメオスタシス — の三部から、構成される、大変に意欲的で、有意義なものでした。

広範囲にわたる、難しい話題にも拘らず、一年有余に及ぶ、幅広い研鑽の成果を、遺憾なく発揮され、多くの図表を駆使しながら、易しく、迫力のある解説発表をしていただきました。

◆『生体の熱力学と光合成』というテーマは、生物学の領域の知識と、化学の領域の知識が、有効に融合して、より高次の領域的な知識の形成が期待される、知識の学問にとって、言わば、試金石の場に位置している重大なテーマです。

◆われわれが生存する21世紀の科学・技術が取り組むべき、重点テーマの一つは、「ネットワークの理論と実際」の探究だと、考えられています。

A・L・バラバシは、「細胞は複雑な分子を切り分け、細胞の部品となるものを作り、細胞が生きるために必要なエネルギーを生み出しているのである。

その作業を担当しているのが「代謝ネットワーク」という、何百ものステップからなる細胞内生化学反応のウェブだ。

このネットワークのノードには、水や二酸化炭素のような簡単な化学物質から、ATP(アデノシン

三リン酸)のような何十もの原子から構成される複雑な分子までさまざまなものがある。

このネットワークのリンクは、分子間の生化学反応だ。

二つの分子AとBが反応してCとDを作るとすると、これら四つの分子は、細胞内の複雑な代謝ネットワーク内で互いにリンクされることになる。」という書き出しで、生物の代謝の、スケールフリーのネットワークについて、記述しています。

◆代謝のネットワークや、更なる、生体のネットワークは、生体の生老病死に、密接に関わる、重大で身近なシステムですが、その最高度の複雑性の故に、なかなか理解と研鑽が進み難い、知識の分野だと思われます。

お互いに、今回のこの機会を、絶好のチャンスと捉えて、新たな挑戦を試みて行きたいと、存じています。

◆この案内状の、最後部に、収録しました 『生体の熱力学と光合成』 と題する、取りまとめは、発表者の内容も踏まえ、世話人が、この1ヶ月をかけ、次の参考文献の知見を抜粋して、集約し、編集したものです。

- D・サダヴァ他著＝石崎・丸山監訳「大学生物学の教科書第①巻細胞生物学」(10・講談社)
- 齋藤勝裕著「基礎から学ぶ化学熱力学」(10・ソフトバンククリエイティブ)
- 「Newton 2008 年4月号」(08・ニュートンプレス)
- 齋藤勝裕著「入門! 超分子化学」(11・技術評論社)
- D・VOET/J・G・VOET 著＝田宮・村松・八木・吉田・遠藤訳「ヴォート生化学」第3版 (05・東京化学同人)
- ニック・レーン著＝齊藤訳「生命の跳躍」(10・みすず書房)
- デニス・プレイ著＝熊谷・田沢・寺町訳「ウエットウェア」(11・早川書房)
- 竹内敬人著「人物で語る化学入門」(10・岩波書店)

◆ この取りまとめは、可能な限りの、正確性、関連性と、包括性を、大切にして作業をしました。皆様には、何度も、詳しく、お読み取りをいただき、繰り返し、ご研鑽の糧として、ご活用いただければ、真に、幸いです。

\*\*\*\*\*

(2) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形成的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

(3) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けて参ります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けて参ります。

(4) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的に申し出下さい。皆様には、今後、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的に申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れを致します。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

## 記

◇ 日時： 2012年7月28日(土) 13:00~17:00(例会)  
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場所： 日本電気企業年金会館 1階会議室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話:03-3413-0111(代)

- \* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話)070-5541-4742
- \* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分
- \* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金  
会館MAP」に収載。 <http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ:

マーク・ブキャナン著=水谷訳 『歴史は「べき乗則」で動く』  
(10・早川文庫) に学ぶ —— [輪読発表] ——

- 第1章~第3章 大河原 敏 男 氏
- 第4章~第6章 北 村 晃 男 氏
- 第7章~第9章 安 平 哲 太 郎 氏
- 第10章~第12章 岩 下 幸 功 氏
- 第13章~第15章 八 尾 徹 氏

■この著作は、21世紀の科学・技術において重要な位置を占める、ネットワークの理論  
に関わる注目すべきテーマを取り扱っています■

□ ご発表の皆様には、A4・2枚の概説（紙幅が足りない場合は、文字のポイントを  
8ポなど、小さくして下さい）を配布して下さい □

□ 各人の発表の持ち時間は、35分（発表25分、質疑10分）です □

\*\*\*\*\*

◇プログラム：

- |                               |     |             |
|-------------------------------|-----|-------------|
| (1) 解説発表： [PART-1]            | 3発表 | 13:00~14:45 |
| <小休止>                         |     | 14:45~14:55 |
| (2) 解説発表： [PART-2]            | 2発表 | 14:55~16:05 |
| (3) 総合的な質疑応答：                 |     | 16:05~16:55 |
| (4) 諸連絡：                      |     | 16:55~17:00 |
| (5) 懇親会： <皆様の積極的なご参加を期待しています> |     | 17:15~19:15 |

\*\*\*\*\*

### 第85回 アブダクション研究会（7/28）の出欠連絡

●7/23（月）までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FA X： 042-356-3810  
E-mail： abduction-owner@yahogroups.jp

岩下 幸功 行

●7/28（土）の研究会に、未定ですが	出席	出席
調整します。	調整	調整
●懇親会に、未定ですが	出席	出席
調整します。	調整	調整
	欠席	欠席

ご署名 \_\_\_\_\_

☆ 出欠の連絡は、グループメールメニューの「投票」コーナーから行うこともできます。  
<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/polls>

---

\*次々回 2012年9月度の第86回アブダクション研究会は、2012年9月29日（土）に  
NEC企業年金会館・1階会議室で、開催します。

\*9月度のテーマは、安平 哲太郎 氏に、次のテーマで、ご発表をいただきます。

□テーマ：『科学の錯誤と創造性—J・P・ランタン「われ思う、故に、われ間違う」に学ぶ—』（仮題）  
文献：J・P・ランタン「われ思う、故に、われ間違う」（96・産業図書）

\*大いにご期待をいただき、奮ってご参加ください。

---

### <定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。  
皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで（第1回～第84回）の研究発表やなされた議論（「議事録」を参照下さい）に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。  
特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

\*\*\*\*\*

# 生体の熱力学と光合成

## 1. はじめに

[1] 生体系は平衡状態ではない。

無秩序に向かおうとする自然界で、生体系は、絶えず自由エネルギーを取り込んで秩序を保つ。

[2] 代謝とは、生体系が、各種の活動を行うのに必要な自由エネルギーを、取り入れ、利用する、全過程を指す。

[3] 生命維持活動——機械的工作、濃度勾配に逆らう物質輸送（能動輸送）、複雑な生体分子の合成など——は、栄養素の分解という、発エルゴン反応と、共役して行われる。

[4] 生体は、必要な自由エネルギーを、いかに取り出すか？ そのエネルギーを、どのように利用するのか？

[5] 光合成生物（植物とある種の細菌）は、太陽エネルギーを利用して、光合成、つまり  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  から、糖と  $\text{O}_2$  を作るという、吸エルゴン反応を行う。

[6] 化学合成生物は、他の生物（元をたどれば、光合成生物）が作った、糖質、脂質、タンパク質などの有機化合物を、酸化して、自由エネルギーを得る。

[7] この自由エネルギーは、普通、ATP（アデノシン三リン酸）など、高エネルギーリン酸化合物を合成する、吸エルゴン反応に、使われる。

[8] 各種の栄養素は、酸化される以外に、一連の反応で、生体分子の共通前駆体にも合成される。

[9] 生体の過程は、非常に複雑だが、定常状態にある。

例えば、成人は40年間に、何トンという栄養素を取り入れ、2万kgもの水を飲むが、体重は、余り変動しない。この定常状態は、複雑な代謝制御の結果である。

[10] 細胞は、どのようにして、数千の化学反応が進行している間に、比較的一定な内部環境——ホメオスタシス——を維持するのであろうか？

[11] これらの化学反応は、代謝経路の形で組織化されている。

代謝経路では、ある反応の産物は、次の反応の反応物となる。

そして、代謝経路は、孤立して存在するのではなく、広範囲に相互作用する。

[12] 個々の経路中の反応は、特異的な酵素によって、触媒される。

細胞内あるいは個体内で、酵素は、ある代謝経路が機能するか否か、機能する場合は、どの程度機能するかを、調節する。

## 2. 生体の熱力学—その1—

[13] 代謝反応と触媒は、生体によるエネルギーの生化学的変換にとって、不可欠のものである。

光エネルギーを使って糖質を作る植物にせよ、食物のエネルギーを力に変えて、調理台に飛び移ろうとする（より多くのエネルギーを得るために食物を見つけることを期待して）猫という動物にせよ、エネルギー変換は生命の大きな特徴である。

[14] 物理学者は、エネルギーを、「仕事をする能力」と定義する。

「仕事」は、ある物体に力を加えてある距離を移動させた時に生じる。

生化学では、エネルギーを「変化をもたらす能力」と捉えた方が便利である。

いかなる細胞もエネルギーを生み出すことは出来ない。

全ての生命はエネルギーを環境から得なければならない。

[15] 基本的な物理法則の1つである、熱力学第一法則は、エネルギーは、作り出すことも、破壊することも出来ない、というものである。

しかしながら、エネルギーはある形から別の形へと変換することは出来る。

そして細胞は、多くのそのようなエネルギー変換反応を行うことが出来るのである。

エネルギー変換は、細胞内で起こる化学的変換、すなわち化学結合の分解、膜を越えての物質輸送などとリンクしている。

[16] エネルギーと代謝には、2つのタイプがある。

エネルギーには多くの形があり、相互に変換することが可能である。

化学エネルギー、電気エネルギー、熱エネルギー、光エネルギー、機械エネルギーなどである。

読書をするとき、光エネルギーが眼の中で化学エネルギーに変換されるし、その化学エネルギーが神経細胞中で電気エネルギーに変換され、脳へと情報が伝達される。

[17] 全ての形のエネルギーは、位置エネルギーと運動エネルギーの2つのタイプに分けて、考えることが出来、両者は、相互に変換が可能である。

■位置（ポテンシャル）エネルギーは、状態ないし位置のエネルギー、すなわち、保存されたエネルギーである。

これは多くの形で、すなわち、化学結合、濃度勾配、電荷の不均衡などの形で保存される。筋肉を緊張させ、飛び跳ねようとしている猫を想像すればよい。

■運動エネルギーは運動のエネルギー、すなわち、仕事をするエネルギーである。

猫が飛び跳ねたとき、緊張した筋肉に蓄えられていた、位置エネルギーの一部が、筋収縮に変換されたのだ。

[18] いかなる生物の中でも、絶えず、化学反応が起きている。代謝は、そのような反応の総和と定義される。

2つのタイプの代謝反応が、全ての生物の全ての細胞の中で起きている。

■同化反応により、単純な分子から複雑な分子が作られる。

アミノ酸からのタンパク質合成は、同化反応である。

同化反応は、エネルギーの入力を必要とし、そのエネルギーを、合成される化学結合の中に蓄える。

■異化反応により、複雑な分子は、単純な分子へと分解され、化学結合中に蓄えられていたエネルギーが放出される。

[19] 同化反応と異化反応は、しばしば、リンクしている。

異化反応で放出されたエネルギーは、しばしば、同化反応ないし生物学的な仕事、例えば、跳んでいる猫の筋収縮、膜を越えての能動輸送のような、細胞活動などを駆動するために使われる。

[20] 生物もまた、物理的宇宙の一部であるから、星を支配する熱力学の法則は、細胞内のエネルギー変換にも当てはまる。

■熱力学第一法則 :

熱力学第一法則は、エネルギー変換の際、エネルギーは作り出すことも消し去ることも出来ない、というものである。

言葉を換えると、「エネルギーを、ある形から別の形へと変換する際に、変換の前後でエネルギーの総量は変化しない（不変である）」ということである。

糖質の化学結合中の位置エネルギーは、ATP の形の位置エネルギーに変換可能である。このエネ

ルギーは、次に運動エネルギーに変換されて、筋収縮などの機械的仕事をするのに用いられる。

### ■熱力学第二法則：

閉じられた系では、変換によって、エネルギーの総量は変わらないが、変換の後では、仕事に使えるエネルギー量は、変換前の量に比べて常に減少する。

第二法則を別の言い方で表すと、閉じられた系では、エネルギー変換を繰り返すにつれて、自由エネルギーは減少し、利用出来ないエネルギーが増大する。

このことは、エントロピー産生として知られる現象である。

[21] どの系でも、総エネルギーは、仕事ができる利用可能なエネルギーと、無秩序へと失われる利用不能のエネルギーを含んでいる。

総エネルギー＝利用可能なエネルギー＋利用不能のエネルギー

生体系では、総エネルギーは、エンタルピー（H）と呼ばれる。

仕事ができる利用可能なエネルギーは、自由エネルギー（G）と呼ばれる。

自由エネルギーは、細胞成長、細胞分裂、細胞の健康の維持などの全ての化学反応のために細胞が必要とするものである。

利用不能のエネルギーは、エントロピー（S）で表すことができる。

エントロピーは絶対温度（T）を乗じた時に、系の無秩序さを表す尺度となる。

以上より、上の式を正確に書き表すと、次のようになる。  $H=G+TS$

われわれにとって重要なのは、利用可能なエネルギーであるから、書き直すと、  $G=H-TS$  となる。

G、H、S の絶対値を測定することは出来ないが、ある一定の温度における、これらの変化を測定することは出来る。

[22] いかなる化学反応の自由エネルギー変化（ $\Delta G$ ）も、産物と反応物の自由エネルギーの差異に等しい。

$\Delta G_{\text{反応}} = G_{\text{産物}} - G_{\text{反応物}}$

このような変化は、プラスの場合もマイナスの場合もあり得る。

もしも、産物の自由エネルギーの方が大きければ、反応には、エネルギーを入力しなければならない（エネルギーは作り出すことが出来ないので、外部から、ある程度のエネルギーを足してやらなければならない）。

[23] 一定温度では、 $\Delta G$  は、総エネルギー変化（ $\Delta H$ ）とエントロピー変化（ $\Delta S$ ）から、次のように定義される。

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

この式から、ある化学反応で、自由エネルギーが放出されるのか、消費されるのかが分かる。

■ $\Delta G$  がマイナス（ $\Delta G < 0$ ）の場合、自由エネルギーは、放出される。

■ $\Delta G$  がプラス ( $\Delta G > 0$ ) の場合、自由エネルギーが、要求 (消費) される。

[24] もし、必要な自由エネルギーが得られなければ、その反応は起こらない。 $\Delta G$  がプラスかマイナスか、また  $\Delta G$  の大きさは、この式の右辺の2つの要素に依存する。

■ $\Delta H$  : 化学反応において、 $\Delta H$  は、その系に加えられたエネルギーの総量 ( $\Delta H > 0$  の場合) か、その系から放出されたエネルギーの総量 ( $\Delta H < 0$  の場合) である。

■ $\Delta S$  :  $\Delta S$  の符号 (プラスかマイナスか) と大きさにより、 $T\Delta S$  の符号と大きさが決まる。言い換えると、一定温度 ( $T$  が不変) の生体系では、 $\Delta G$  の符号と大きさは、エントロピー変化に大きく依存するということである。エントロピーが大きく変化すれば、 $\Delta G$  の値も大きくマイナス側に移動する ( $T\Delta S$  の前のマイナス符号が示す通り)。

[25] ある化学反応において、エントロピーが増大する場合は、その産物は反応物に比べて、より無秩序で乱雑である。

タンパク質が、アミノ酸に加水分解されるように、反応物に比べて、産物の数が多い場合は、産物は自由に動き回ることが出来る。

アミノ酸溶液は、ペプチド結合やその他の力により、動きが制限されている、タンパク質溶液に比べて、より無秩序な状態であると言える。

だから、加水分解反応では、エントロピー変化 ( $\Delta S$ ) はプラスである。

もし、産物の方が、反応物に比べて、少数で動きが制限されている場合は、 $\Delta S$  はマイナスとなる。例えば、ペプチド結合により、アミノ酸が繋がっている、大きなタンパク質は、その材料となる数百、数千のアミノ酸の溶液に比べると、自由度は低いと言える。

[26] 熱力学第二法則から、次のことも予告される。すなわち、エネルギー変換の結果として、無秩序は増大する傾向がある。

化学的変化、物理的変化、生物学的過程のいずれにせよ、エントロピーは増大し、無秩序あるいは乱雑さへと向かう。

この無秩序が増大する傾向により、物理的過程や化学反応の方向性が決定される。

これにより、ある反応が、ある一方向に進み、逆の方向には進まないことが説明できる。

### 3. 光合成—その1—

[27] 21世紀の化学は光合成の化学だ、という化学者もいる。光合成は、それほど複雑である。

同時に、これが解明され、人類が人工的に再現することが出来たら、エネルギー問題、食料問題、その他の諸々の問題が、一挙に解決されるかも知れない程、重要な意義を持っている。

**[28] 光合成とは、簡単に言えば、太陽のエネルギーを化学物質に転換して、貯蔵する反応である。**

太陽のエネルギーには、光として地球に到達する光エネルギーと、熱として到達する熱エネルギーとがある。

光合成は、このうち、光エネルギーを貯蔵する反応系であり、大きく、二つの反応に分けて考えることが出来る。

一つは、太陽の光エネルギーを化学物質（化学エネルギー）として貯える反応系であり、これを明反応という。もう一つは、こうして蓄積した化学エネルギーを用いて、二酸化炭素と水をグルコースなどの糖に転換する反応で、暗反応と呼ばれる。

**[29] 明反応は、太陽の光エネルギーを、化学物質（化学エネルギー）として貯える過程である。**

植物において、光合成を行う細胞は、葉緑体である。

葉緑体は、複雑な構造を持った器官の一種だが、大切なのは、チコライドと呼ばれる組織と、ストロマという液体だ。

チコライドをおおうチコライド膜には、クロロフィルが埋め込まれている。

クロロフィルは植物を緑色にしている物質であり、太陽エネルギーを化学物質として貯蔵するという大変な仕事をしている。

われわれが、こうして生存して行けるのも、クロロフィルに依存している、と言っても過言ではない。

このクロロフィルが、太陽光を吸収して、そのエネルギーを、化学物質であるアデノシン三リン酸（adenosine triphosphate : ATP）に貯蔵する。この過程を明反応という。

**[30] 暗反応は、この ATP のエネルギーを用いて、二酸化炭素と水から、グルコースなどの糖を合成する過程である。**

この暗反応が行われる場が、ストロマである。

**[31] 植物では、葉緑体の中で、電子を取り出す仕事が行われる。**

葉緑体は、草木の葉の細胞に見つかる、微小な緑の構造体で、葉を全体として緑色にしている。

葉緑体の名は、また、それを緑色にしている色素に由来する。

この色素を葉緑素（クロロフィル）と言い、光合成で太陽のエネルギーを吸収する役割を果たす。葉緑素は、葉緑体内を構成する、とても複雑な膜系に埋め込まれている。

それは SF 映画に出て来る、エイリアンの動力装置にそっくりの見かけで、つぶれた円盤がたくさん積み重なったものが、様々な角度や高さで交錯するチューブを介して繋がっている。

円盤そのものでは、光合成の大仕事が行われる。水から電子が取り出されるのだ。

[32] 水から電子を取り出すのが難しく、植物はその仕事を、非常にややこしいものにする。

タンパク質と色素の複合体は、分子としては、とてつもなく巨大で、さながら小さな都市のようになる。

そして結局のところ、光化学系Ⅰと光化学系Ⅱという、二大複合体が出来、どの葉緑体にも、そんな光化学系が何千個も収まっている。

光化学系の仕事は、光を捉え、結果的に、生体物質に転化させることだ。

その仕組みの解明には、1世紀近くを要し、また、これまでの最高に鮮やかで巧みな部類に入る実験が幾つか必要だった。

ここでは、それは語らないが、ここで注目する必要があるのは、解明された事実と、光合成の「発明」について語るべきこと、だけなのである。

[33] 光合成の理論の核心には、全体を理解する手引きとなる、「Z機構」というものがある。

このシステムは、生化学の学生を魅了すると同時に畏怖させもしている。

1960年に聡明だが遠慮がちなイギリス人、ロビン・ヒルによって初めて説明された、Z機構は、光合成の「エネルギー図」を表している。

ヒルの言明は、簡潔だが、分かり難いことで悪名が高かった。分かり切ったようなことを、いちいち言わせて、ヒルを苛立たせたくなかったから、ヒル自身の研究室のメンバーさえ、1960年にZ機構の仮説が『ネイチャー』誌に載った時、それまで、彼の研究内容を殆んど知らなかったので、驚いた。

実を言うと、Z機構は、ヒル自身の成果に基づいてはいなかった。

これは非常に重要な事実であり、むしろ実験で得られた、多数の不可解な知見から引き出されたものだった。

そんな知見の筆頭と言えるのが、熱力学の興味深い問題だ。

[34] 光合成は、新たな有機物質だけでなく、生命の「エネルギー通貨」であるATPを、生み出すことが、解っている。

意外にも、この二つの生成物は、常にセットになっているように見えた。

光合成で生じる有機物質が増えるほど、ATPも増え、また逆のことも言えるのだ（有機物質の量が減れば、ATPの生成量も減る）。

太陽は、どうやら同時に、二つのタダ飯をくれているらしい。

ロビン・ヒルは何と、このたった一つの事実から、光合成のメカニズム全体を把握する洞察に至った。

天才とは、誰より早く明白なことに気づく才能だ、と世に言う通り。

[35] それでも——ヒルと関わりのあるものは、大抵そうだが——、「Z機構」という言葉さえ、簡潔なのに、分かり難くて、誤解を招く。

Zは、実際には90度回転して「N」とすべきだ。

そうすれば、光合成のエネルギー図を、もっと正確に表すことになる。

「N」の第1画（かく）を、真っすぐ上る反応と見なせば、その仕事のために、エネルギーを加えなければならない。

そして「N」の斜めに下る、第2画は、下りの反応となる——この時放出されるエネルギーは、ATPの形で捉えて、保存することが出来る。

最後の1画も、上りの反応で、また、エネルギーのインプットが必要になる。

**[36] 光合成では、2つの光化学系——光化学系ⅠとⅡ——が、「N」の土台をなす2点に存在する。**

光子が、最初の光化学系（光工学系Ⅱ）に当たると、電子を高いエネルギー準位へ打ち上げる。

続いて、この電子のエネルギーが、幾つかの分子の関わる、小さな段階を経て、なだれ落ち、ATPの生成に必要な、エネルギーを提供する。

再び、低いエネルギー準位に戻ると、この電子は、2つ目の光化学系（光工学系Ⅰ）に、たどり着き、そこで、また、光子によって、高いエネルギー準位へ打ち上げられる。

この2度目の高みから、電子は最終的に、糖を合成する第一段階における、二酸化炭素へ渡る。

Z機構を描いたリチャード・ウォーカーの漫画では、ハンマーの一打として描かれた、光子のエネルギーが、電子を、高いエネルギー準位へ打ち上げる。

この電子が、低いエネルギー準位へ、なだれ落ちる際に、放出されるエネルギーの一部が、細胞内の仕事の動力となる。

そこから、また、光子が、電子を更に高いエネルギー準位へ打ち上げ、そこで、電子は、高エネルギーの分子（NADPH）の形で捉えられ、後に、二酸化炭素と反応して、有機分子を生み出す。

**[37] Z機構——あるいはN機構と呼んでも良いが——は、ひどく回りくどい、やり方で、仕事をするものの、それには、技術的な理由がいろいろある。**

水から電子を取り出す仕事を、二酸化炭素を糖へ変える仕事に、何か他のやり方で結びつけることは、化学的には、不可能に近い。

その理由は、電子の伝達に関わる性質の他、特に、個々の化合物に対する電子の化学的親和性と関係がある。

水は非常に安定した分子で、その中の電子に対して、高い親和性を持っている。

水から電子を奪い取るには、莫大なまでの、引き抜く力、つまりは、非常に強力な酸化剤が必要になる。

この強力な酸化剤は、「貪欲な」タイプとなった葉緑素であり、高エネルギーの光子を吸収して、おとなしいジキル博士から変身を遂げた、言わば分子のハイド氏なのである。

しかし、引き抜くのが巧いものは、得てして、押し込むのは巧くない。

電子を強く掴む分子は、電子を与えたがらない。

それは、ちょうど、人間嫌いのハイド氏、つまりは、貪欲な守銭奴が、自分から気前良く富を与えようとしなないのと同じだ。

このタイプの葉緑素は、そうなのである。

光で活性化した、それは、水から電子を引き抜く、莫大な力をもっているが、他のどこかに電子を押し込む力は殆んど持たない。

専門用語で言えば、強い酸化剤だが、弱い還元剤なのだ。

**[38] 二酸化炭素は、これと、逆の問題を提起する。二酸化炭素も、非常に安定した分子なので、それ以上、電子を詰め込まれたい、という化学的な欲求を持たない。**

二酸化炭素は、強い力で押し込むもの——専門用語では、強い還元剤——から、仕方なく、電子を受け取るに過ぎないのだ。

そのためには、別のタイプの葉緑素が要る。

押し込むのが非常に巧くて、引き抜くのは下手なものだ。

それは、貪欲な守銭奴でなく、むしろ怪しげなものを通行人に押し付けたがる「ストリートマジシャン」に近い。

光で活性化すると、この形態の葉緑素は、電子を取られたがる別の分子——共犯者で、マジシャン仲間でもある NADPH——に、そして、最終的には二酸化炭素に、電子を押し込む力を持つようになる。

[NADPH とは、還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリリン酸のこと。これは強い「還元剤」、つまり強い力で電子を押し込むものである。]

**[39] だから、光合成には、2つの光化学系が存在するのであり、意外ではない。だが、もっと手強い疑問がある。そんな複雑な相関のあるシステムが、どうやって進化を遂げたのだろうか？**

このシステムには、実は5つの要素がある。第1の要素は、「酸素発生複合体」だ。

これは、分子のクルミ割り器のようなもので、水分子を割るために、きれいに並べる役目を果たす。

それから、割って中の電子を一つずつ取り出すと、廃棄物として酸素が放出されるのである。

次に登場するのが、「光化学系Ⅱ」（明反応。ややこしい話だが、二つの光化学系は歴史的な理由により、逆の順序で名前が付いている）であり、これは、光によって活性化すると、分子のハイド氏に変身し、酸素発生複合体から実際に電子を引き抜く。

そこからは、「電子伝達系」の出番となる。電子伝達系は、ラグビーの選手がピッチを走りながらボールをパスして行くように、電子を運んで行く。

このとき、下りのエネルギー勾配を利用して、少しばかり ATP を作ってから、同じ電子を「光化学系Ⅰ」（暗反応）に渡す。

そこで、また、新たな光子が電子を高エネルギーへ打ち上げると、電子は分子の”マジシャン”である「NADPH」に収められる。

NADPH は、電子を強く押し込む力を持ち、再び電子を取られたがる、と言ってもいい。

それから、最後に、二酸化炭素を活性化して、糖に変えるのに必要な、分子機構のお出ましである。

光化学系Ⅰが生み出した、分子のマジシャンを使う、この二酸化炭素から糖への転化は、光でなく、化学反応を原動力としており、暗反応という。

[40] この5つの要素が、順に働いて、水から電子を引き抜き、二酸化炭素に、それを押し込む。

これは、恐ろしく複雑なクルミの割り方だが、このクルミを割るには、唯一の方法のようにも思える。

ここで、進化における大きな疑問が生じる。

こうした複雑な相関を持つシステムが、どうやって生まれ、まさに正しい形に——唯一の形かも知れないものに——組織され、酸素発生型光合成を始動させたのだろうか？

## 4. 生体の熱力学—その2—

[41] これまで、熱力学の法則が、生命に当てはまることを見て来たので、これらの法則が、生化学反応に、どのように、当てはまるのかを見てみよう。

化学反応により、エネルギーが放出されたり、消費されたりする。

同化反応により、細胞内の複雑さ（秩序）が増大するのに対して、異化反応により、細胞内の複雑さが減少する（無秩序が創造される）。

従って、同化反応には、エネルギーが必要であり、異化反応により、エネルギーが放出される。

■異化反応により、タンパク質などの秩序立った反応物が、アミノ酸などの、より小さくて乱雑に分布する産物に分解される。

自由エネルギーを放出する反応 ( $\Delta G < 0$ ) は、発エルゴン反応と呼ばれる。

例えば : 複雑な分子  $\rightarrow$  自由エネルギー + 小分子

■同化反応により、多数のアミノ酸などの、より小さな反応物（より乱雑な分子）から、タンパク質などの高度に秩序立った単一の産物が産生される。

自由エネルギーを必要とする反応 ( $\Delta G > 0$ ) は、吸エルゴン反応と呼ばれる。

例えば : 自由エネルギー + 小分子  $\rightarrow$  複雑な分子

[42] 原則として、化学反応は、正反応も逆反応も起こり得る。

例えば、化合物Aが、化合物Bに変換可能ならば ( $A \rightarrow B$ )、原則として、Bは、Aに変換可能である ( $B \rightarrow A$ )。

ただし、A、Bそれぞれが、ある濃度の場合、その条件下では、これらの反応のうち、一方だけがよく進む。

全体の反応は、正反応と逆反応の間の、競合の結果である ( $A \rightarrow B$  と  $A \leftarrow B$ )。

Aの濃度を上げると、正反応の速度が増大するし、Bの濃度を上げると、逆反応の速度が増大する。

AとBの濃度が、ある値の時、正反応と逆反応の速度は等しくなる。

この濃度では、個々の分子は、形成されたり、分解されたりしているが、系の正味の変化は、起こらない。

この正反応と逆反応の間のバランスが取れた状態を、化学平衡と呼ぶ。

化学平衡は、静的な状態、正味の変化がない状態、 $\Delta G = 0$ の状態である。

#### [43] 化学平衡と、自由エネルギーは、関連している。

どの化学反応も、ある程度までは進行するが、必ずしも、完了するまで進行する訳ではない。

言い換えると、存在する反応物は、必ずしも、全てが、産物（生成物）に変換される訳ではない。

それぞれの反応には、特定の平衡点があり、その平衡点は、ある特定の条件下で、その反応により放出される、自由エネルギーと関連している。

どの反応でも、自由エネルギー変化（ $\Delta G$ ）は、平衡点と直接の関連がある。

平衡点が、反応完了に近ければ近い程、より大きな自由エネルギーが放出される。

反応の $\Delta G$ が大きな正の数である場合、その反応（ $A \rightarrow B$ ）は、なかなか、右へは進まないということの意味する。

しかし、産物が存在する場合は、その反応は、逆に、すなわち、左に（ $A \leftarrow B$ ）進む（ほとんど全てのBがAに変換される）。

$\Delta G$ の値がゼロに近いのは、容易に、両方向に進み得る反応の特徴である。

反応物と産物が、殆んど同一の自由エネルギーを持っている。

\*\*\*\*\*

### ■ヘルムホルツの「自由エネルギー」と、ギブスの「自由エネルギー」■

19世紀末、熱力学を化学に応用した「化学熱力学」という化学の新分野が開拓され、化学反応が自発的に起こるかどうかを理論的に予言することが可能になった。

当初、化学者たちは、発熱反応は起こり易い、むしろ、自発的に起こると考えていた。

エネルギーを放出することによって、系が安定化する、という考えで、わかり易い理論である。

しかし、発熱反応ほど、例は多くはないが、自発的に起こって、反応の際にエネルギーを吸収する、「吸熱反応」も知られていた。

身近な例を探すと、水の蒸発がある。これは、化学反応ではなく、物理変化だが、考えることは本質的に同じである。

水が蒸発する過程が吸熱的であることは、水を加熱すると、蒸気がどんどん発生すること、などから想像できる。

しかし、水の蒸発は、常温常圧で、自発的に起こっている。

従って、反応が自発的に起こるかどうかを、反応熱だけでは、説明できない、のは明らかである。

この問題に対して、ドイツのヘルムホルツは、ある系が持っているエネルギーのうち、仕事として

使える部分を「自由エネルギー」と呼んだ。

ヘルムホルツが提唱した自由エネルギー、「ヘルムホルツエネルギー」Fは、次式で表される。

$$F = U - TS$$

ここで、Fはヘルムホルツエネルギー、Uは系の内部エネルギーで、反応熱に相当する。

Tは絶対温度を表す。

Sは、Sで表される、エントロピーで、系の乱雑さを表す量として説明される。

例えば、水が水蒸気になれば、系の乱雑さ、つまりエントロピーは増える。

ヘルムホルツの主張は、反応が自発的に進むかどうかは、反応熱Uだけでは、決まらず、エントロピーも考慮しなければならない、と要約できる。

ただし、ヘルムホルツエネルギーは、反応が一定温度、一定体積で進む、という条件で成立する式である。

気体が絡む化学反応の場合、一定体積という条件は、面倒である。

反応を、閉じた容器の中で、行わなければならないからである。

1873年に、ギブスは、反応が一定温度、一定圧力の下で進む、という条件での自由エネルギーを定義した（Pは圧力、Vは体積）。

$$G = H - TS = U + PV - TS$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

これを「ギブスエネルギー」Gという。

Hはエンタルピーと呼ばれ、系の持つエネルギーに対応し、反応熱はこのHで決まる。

Gには、体積の変化を補正する項（PV）が付け加わっている点だけ、Fと違っている。

[福永註 : 大気圧の下で進む反応には、体積変化をとらなう。体積変化は、仕事であり、エネルギー。従って、反応におけるエネルギー変化には、内部エネルギー（分子がもつ固有のエネルギーのことで、位置エネルギーと同じに考えてよい）の変化分の他に、体積変化の分を合わせて、考える必要がある。

この、 $U + PV$ （P：圧力、V：体積）が、H（エンタルピー）として定義される。]

化学反応が、自発的に起こるかどうかは、出発系（反応物）と生成系（産物）のGの差 $\Delta G$ で決まる。 $\Delta G$ が負の値をとると、反応は、自発的に起こる。（発熱反応は $\Delta G$ が負）。

水の蒸発の過程は吸熱的だから、 $\Delta H$ は正の値（この場合 $\Delta H$ は系に加えられたエネルギーの総量）になるが、エントロピーが増大するから、第二項（ $T \Delta S$ ）の方が大きくなり、 $\Delta G$ は負の値になって、水の蒸発は、自発的に起こる。

ギブスエネルギーのもう一つの重要な役割は、平衡の位置の予測である。

$\Delta G$ 温度が決まれば、平衡の位置、つまり、平衡が、どのくらい右辺に片寄るかが計算できる。

アンモニア合成反応の $\Delta G$ がわかれば、任意の温度での平衡の位置が算出できるから、最上の反応条件を、正確に決めることができる。

$\Delta G$ と平衡の位置の関係は、化学理論の進歩が工業的な問題に生かされる良い例である。

ギブス（1839～1903）は、アメリカの化学が、まだ、現在のように世界をリードする段階に達していない時代に、化学に重要な貢献をした。

\*\*\*\*\*

## 5. 光合成—その2—

[44] 植物の細胞の中には、核やミトコンドリア、そして葉緑体が見える。葉の細胞の中には、50～100個の葉緑体があり、細胞の中を移動したり、回転して向きを変えたりしている。

葉緑体の大きさは、直径数マイクロメートル。葉緑体の中には、円盤が積み重なったような構造が見える。この円盤は「袋」になっていて、袋の皮に当たるチラコイド膜が、光合成の主な舞台となる。

チラコイド膜は、脂質分子が一様に並んだ膜になっている。膜の厚さは、約 5.5 ナノメートル。その中に、形の異なるタンパク質の塊が埋め込まれている。3種類のタンパク質複合体と2種類の酵素こそが、光合成を行う主役達である。酵素のうち一つは、膜の中ではなく、ストロマという、葉緑体の中の空間に浮かんでいる。

[45] 1. 光を捕まえ、電子に置き換える : まず、光を捕まえ、電子に置き換えるのは、タンパク質複合体「光化学系Ⅱ」である。この複合体の特徴は、光を受け取る七つの「受信アンテナ」と、集めた光を電子に置き換える「反応中心」がセットになっていることである。

反応中心とその周囲のタンパク質をあわせた横幅は、10 ナノメートル。受信アンテナ（アンテナクロロフィルタンパク質）で受け取った光は、興奮（励起エネルギー）となって反応中心に伝えられる。伝わった興奮は反応中心で電子に姿を変える。七つの受信アンテナの中には、合計 315 個のクロロフィルが埋め込まれている。クロロフィルが光を受け取ると、興奮し、その興奮を他のクロロフィルに伝える。このような興奮の伝わり方を、「共鳴」という。この興奮は最終的に、反応中心にある特別なクロロフィルに渡される。反応中心には、光を電子に置き換えることが出来る、特別なクロロフィルが存在している。

この特別なクロロフィルは、光を受け取ると、興奮状態になる（励起状態）。興奮状態から元の状態に戻るとき、クロロフィルは電子を 1 個追い出す。このとき「光」が「電子」に置き換わったことになる。受信アンテナから興奮（励起エネルギー）が伝わって来ても、特別なクロロフィルは電子を 1 個追い出すことが出来る。この特別なクロロフィルに電子を供給するために、水を分解する装置が備わっている。それが「マンガンクラスター」である。

マンガン原子4個の集合体に、水分子が結合すると、マンガンが電極の役割をして、水分子が分解され、原子同士を繋ぎ止めていた電子が外れる。外れた電子は中継所（電子伝達体）を經由して、反応中心の特別なクロロフィルに渡される。電子が外れた後には、水素イオンと酸素分子が生じ、

酸素分子はチラコイド膜の外側へと出て行く。水分子がどのように結合するかは未だ解っていない。2個の水分子が分解されると、1個の酸素分子と4個の水素イオンが生じる。水素イオンは、チラコイド膜の内側に溜まる。チラコイド膜の外側へ出て行った酸素分子は、最終的には大気へ。

[46] 2. 電子を伝える : 1. で、光は電子に姿を変え、別のタンパク質複合体へ移動する。このタンパク質複合体「シトクロムb6 f」は、電子が寄り道する“途中の駅”である。このタンパク質複合体の横幅は最も広い所で、約7ナノメートル。反応中心のクロロフィルから飛び出した電子は、三つのタンパク質複合体（光化学系Ⅱ、シトクロムb6 f、光化学系Ⅰ）を次から次へと伝わっていく。

伝わると言っても、タンパク質複合体同士は離れた場所にあるため、少々手間がかかる。膜の中を移動することが出来る中継所（プラストキノン）や、水中を泳ぐことが出来る中継所（プラストシアニン）が、間を繋いでいるのである。

光のエネルギーによって、反応中心の特別なクロロフィルから電子が追い出される。追い出された電子は、中継所の役目を果たす分子（プラストキノン）を介して、次のタンパク質複合体「シトクロムb6 f」へと運ばれる。その後、電子は更に別の中継所（プラストシアニン）を経て、最後のタンパク質複合体（光化学系Ⅰ）へと運ばれる。プラストキノンは、反応中心で電子を乗せると、そのまま膜の中へ出て、隣のタンパク質複合体（シトクロムb6 f）まで移動する。この時、チラコイド膜の外側にある水素イオンを2個くっ付けて運ぶ。プラストキノンは、タンパク質複合体（シトクロムb6 f）に到着し、電子を放す。この時、水素イオンをチラコイド膜の内側に放す。放された電子は、プラストシアニンの内部の銅イオンが受け取る。プラストシアニンは、水中を泳いで、電子を運ぶことが出来る。

[47] 3. 伝わって来た電子が、たどり着く : プラストシアニンは、“終着駅”のタンパク質複合体（光化学系Ⅰ）にくっついて、電子を放す。電子の“終着駅”となる、タンパク質複合体「光化学系Ⅰ」。このタンパク質複合体の横幅は、約14ナノメートル。電子は、最後のタンパク質複合体に到達する。

その後、チラコイド膜の外の空間（ストロマ）で待機している、“電子の運び屋”に移る。この時“運び屋”は、ストロマ中にある水素イオンも一緒に受け取る。こうして運ばれる電子と水素イオンが、後のデンプン合成に使われることになる。デンプン合成のためには、電子がストロマまで運ばれる必要がある。しかし、最初に受け取った光のエネルギーだけでは、電子はストロマまで一気に移動することが出来ない。そこで、もう一度光を受け取る。最後のタンパク質複合体（光化学系Ⅰ）がもう一度光を受け取ると、電子は最終的に、ストロマ中に待機していた運び屋（NADP<sup>+</sup>）に水素イオンと一緒に受け取られ、水素イオンと共にデンプンをつくる過程へと運ばれる。この一連の過程を「電子伝達系」という。

[48] 4. **高エネルギー物質 (ATP) を作る** : デンプンを作る反応では、電子の他にエネルギーが必要だ。デンプンを作るときに必要なエネルギー (ATP) を作るのが「ATP 合成酵素」である。酵素の頭は、横幅約 10 ナノメートル。「ATP 合成酵素は、くるくると回転する世界最小の分子モーターである。エネルギーを作り出す仕組みは、(1) まず、膜に埋め込まれている二つのタンパク質 (A, B) の間から、水素イオンが膜に入る。(2) A は回転するタンパク質 (回転モーター)、B は膜に固定されたタンパク質である。水素イオンは回転モーターを回しながら、酵素の“土台”の部分を通り抜ける。(3) この時、モーターに付いている酵素の軸も一緒に回転する。(4) 軸には、酵素の頭の部分が乗っている。ところが、この頭は、「固定子」によって膜に固定されているために、回転はしない。そのため、頭の中で“摩擦”が生じることになる。(5) 例えば、木の板に木の棒を立てて回転させると、火を起こすことが出来る。「摩擦」を「熱」に変えているのだ。ATP 合成酵素の場合は、「摩擦」を「化学結合」に変えることが出来る。その結果出来るのが、ATP (アデノシン三リン酸) という化合物である。摩擦によって頭の内部に生じたエネルギーを使って、ADP とリン酸が結合し、ATP となる。この ATP という化合物には、摩擦で生じた分のエネルギーが貯められていることになる。

ATP 合成酵素では、水素イオンが酵素の“土台”の部分を通り抜けることで、モーターを回転させる。その回転数は 1 秒間に 17 回転で、この間に 50 個の ATP を作り出す。では、なぜ水素イオンは酵素を通り抜けるのだろうか。水素イオンの数は、膜の内側で多くなっているが、膜の外側では少なくなっている。このような状態を、「濃度差」があるという。濃度差がある場合、濃度の高い所 (膜の内側) では、より強い「浸透圧 (押し出す力)」が生じる。そのため、膜の内側の水素イオンは、濃度の低い所 (膜の外側) へと押し出されてしまう。押し出される時に、水素イオンは酵素の土台の部分を通り抜ける。チラコイド膜の内側で水素イオンの濃度が高くなっている理由は二つある。既に見て来たように、膜の内側で、水が分解されて水素イオンが作られたことと、電子を伝える“中継所”プラストキノンが、水素イオンを膜の外側から内側に運び込んだことである。

[49] 5. **デンプンを作る** : デンプンの材料となる二酸化炭素を取り込む酵素「ルビスコ」。他の主役達とは異なり、ストロマの中に浮いている。ルビスコの大きさは直径約 10 ナノメートル。

ここまでの過程で、デンプンの合成に必要な「電子と水素イオン」、そして「ATP」が調達された。もう一つ、デンプンの合成に必要なのは、大気中から吸い込んだ「CO<sub>2</sub>」だ。CO<sub>2</sub> は、1 個の炭素原子をもつ小さな分子である。一方、デンプンとは、時には数万個以上もの炭素原子が結合した巨大な分子だ。つまり、デンプンの合成とは、CO<sub>2</sub> が持つ炭素原子を次々に繋げていく過程に他ならない。葉緑体の中では、まず CO<sub>2</sub> から、3 個の炭素が繋がった糖が出来る。この過程は、A の 1~7 によって示される。電子伝達系で調達された電子と水素イオン、そして ATP は、この過程で使われる。その後、出来上がった糖は、二つ繋がってブドウ糖となり、ブドウ糖が繋がってデンプンとなる。この過程は、B の 1~5 によって示される。植物は昼間、盛んに光合成を行ってデンプンを貯蔵する。そして、夜はデンプンを分解し、呼吸などに利用する。[糖は水に溶け易く、デンプンは水に溶け難い。いずれも炭素・水素・酸素からなる炭水化物。]

A. **カルビン・ベンソン回路 (1~7)** . . . . . CO<sub>2</sub> から炭素 3 個の糖 (GAP) をつくる、回

路状に繋がった一連の化学反応。この回路反応が進むには、CO<sub>2</sub> の他、電子伝達系から供給された「ATP」と「電子と水素イオン」が必要である。なお、それぞれの糖などはストロマ内に多数拡散しており、実際に回路状に配置されている訳ではない。

1. CO<sub>2</sub> を捕まえる・・・ストロマに浮かんだ酵素「ルビスコ」が CO<sub>2</sub> を捕まえる。 2. CO<sub>2</sub> をくっ付ける・・・炭素5個の糖 (RuBP) [RuBP の分子式=C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>11</sub>P<sub>2</sub>] に、捕まえた CO<sub>2</sub> を1個くっ付けて、炭素6個の糖を作る。 3. 二つに分ける・・・炭素6個の糖を二つに分けて、炭素3個の糖 (PGA) [PGA の分子式=C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>7</sub>P] を作る。 4. ATP からリン酸を受け取る・・・糖 (PGA) は、ATP からリン酸を受け取る。これによって糖が活性化する。ATP は ADP になる。 5. 電子と水素イオンを受け取る・・・糖は、運び屋 (NADPH) から電子と水素イオンを受け取る。この時、リン酸を一つ放出する。役目を終えた運び屋は、NADP<sup>+</sup>になる。 6. 材料が完成する・・・デンプンの材料となる、炭素3個の糖 (GAP) [GAP の分子式=C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>6</sub>P] が完成する。 7. 再生する・・・出来上がった糖 (GAP) の一部は、炭素5個の糖 (RuBP) を再生するために使われる。

A6で完成した糖 (GAP) は、(イ) 炭素5個の糖 (RuBP) を再生するために使われる。 (ロ) 葉緑体の外へ出て、「ショ糖」となり、植物の呼吸などに使われる。実や根に向かって、デンプンの一部になるものもある。 (ハ) デンプンをつくる、Bの1~5のルートに向かう。

B. デンプンの合成と分解 (1~5)・・・GAP からブドウ糖 [ブドウ糖の分子式=C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>] を経て、デンプン [デンプンの分子式=(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>] が合成される。光合成が盛んな昼間は、完成した糖 (GAP) を2個繋げてブドウ糖を作り、デンプンの形で貯蔵する。

1. ブドウ糖が出来る・・・炭素3個の糖 (GAP) が2個結合して、炭素6個のブドウ糖になる。 2. 鎖のように連なる・・・ブドウ糖が鎖のように長く連なる。これを、「アミロース」という。 3. ラセンを描き、デンプン粒になる・・・繋がったブドウ糖の鎖は、ラセンを描く。コンパクトにまとめられたブドウ糖は、大きな塊になる。これが「デンプン」である。デンプン粒の大きさは一定ではないが、時には数万個のブドウ糖が繋がることもある。植物は、光のエネルギーを使って、空気から、これほど複雑なものを作っている。 4. デンプンを分解する・・・光合成の行われない夜間には、デンプン粒は、分解されてブドウ糖の形に戻される。 5. 糖は葉緑体の外へ・・・ブドウ糖は更に分解されて GAP となり、葉緑体の外へ出て、呼吸や成長のために使われる。

[50] 光合成で出来たデンプンは、他の生物に次々と受け渡される 光合成で作られた糖やデンプンは、植物が呼吸をしたり、体を作ったりするのに使われる。そして、自ら養分を作り出せない動物は、植物を食べることで命を維持している。つまり、元をたどれば、われわれの体を作っている炭素は、植物が空気中から取り込んだ CO<sub>2</sub> なのだ。

[51] 植物や動物、そして、これらの遺骸を分解する菌や細菌は、呼吸をして CO<sub>2</sub> を吐き出す。その多くは、また、植物が、光合成で取り込むことになる。こうして、地球の炭素は、光合成を介して循環している。ただし、光合成が循環させているのは、炭素だけではない。炭素と一緒に化合物を作る、酸素や窒素、硫黄も循環させているのだ。

**光合成は、地球の生命維持装置** (1) 植物は、太陽光のエネルギーを使って光合成をし、養分を作り出す。(2) 動物は植物を食べ、(3) これらの遺骸は菌や細菌によって分解される。(4) 分解された後の物質の多くは、いずれ植物によって取り込まれる。

こうして、光合成で取り込まれた炭素が循環する。植物が体内で作る化合物には、炭素だけではなく、酸素や窒素、硫黄なども含まれているため、これらの物質も、それぞれ循環する。光合成が止まれば、自ら養分を作ることが出来ない生物は生きて行くことが出来ない。光合成は、地球に暮らす生物の命を維持しているのである。

**1. 生産者が太陽の光を使って養分を作り出す**・・・植物や植物プランクトンは、太陽の光エネルギーを使って光合成をし、糖やデンプンを作り出す。(この他、光合成細菌も太陽のエネルギーを使って養分を作っている。ただし、電子を供給する手段として、水を使わないため、副産物としての酸素は出さない。) 消費者である他の生物に受け渡された養分が呼吸に使われると、エネルギーは熱として逃げて行く。もちろん、植物や植物プランクトンが呼吸をすることで、エネルギーは熱として逃げて行く。

**2. 動物が光合成で作られた養分を食べる**・・・光合成で作られた養分は、植物や植物プランクトンの体となり、直接的または間接的に、消費者としての動物に食べられる。動物が呼吸をすることで、エネルギーは熱として逃げて行く。

**3. 遺骸が分解される**・・・植物や動物の遺骸は、菌や細菌(分解者)によって分解される。菌や細菌が呼吸をすることで、エネルギーは熱として逃げて行く。

**4. 再び光合成で取り込まれる**・・・菌や細菌が分解した後に残った物質は、環境中に放たれて、いずれ再び、生産者によって取り込まれる。

生体の体内の分子の骨組みは、炭素で出来ている。核酸、タンパク質、脂質、ビタミン、などの生体内分子は、大きさや形、役割などが、それぞれ異なるが、炭素を骨格に持っていることは共通している。これらの化合物に含まれる炭素は、光合成で作られた糖やデンプンに含まれていた炭素を再利用したものである。核酸・・・核酸の代表例は DNA。塩基とペントース(五つの炭素をもつ糖)とリン酸からなる「ヌクレオチド」が、2重らせん構造をなしている。タンパク質・・・アミノ酸が連なって出来ている。アミノ酸は「カルボキシル基」という炭素を含んだ“腕”をもつ。脂質・・・エネルギーを貯蔵する脂肪組織の他、細胞膜にも含まれている。ビタミン・・・ビタミンCをはじめ、体を正常に働かせるために必要な化合物である、ビタミンには炭素が含まれている。

**温暖化=年々増加する二酸化炭素を減らす方法は、今の所、光合成しかない=** 過去 100 年間で、地表の温度は、平均 0.74 度 C 増加したと言われている。その結果、現在は過去 1300 年間で最も暑い時代を迎えているのだという。温暖化の主な原因は、石油や石炭といった、化石燃料を短期間で大量に燃やしたことで考えられている。化石燃料は炭素を含むため、これを燃やすことで酸素と結びつき、CO<sub>2</sub> が生じる。こうして出された CO<sub>2</sub> は、海に溶け込んだり、植物や植物プランクトンが光合成で吸収したりする。そのうち、光合成で吸収された分は、物質の循環

に取り入れられる。しかし、急激に増えたCO<sub>2</sub>は吸収し切れず、大気中に残る。残ってしまったCO<sub>2</sub>を減らすには、どうしたら良いのだろうか。現在、地下貯留などの技術開発が進められているが、大規模な実用化には至っていない。今は、光合成によって吸収されることに頼っている状態だ。CO<sub>2</sub>の排出量と吸収量が、差し引きゼロになる状態を、「カーボン・ニュートラル」と言う。その実現を目指して、現在、植林や砂漠化防止の活動が行われている。

## 6. 生体の熱力学—その3—

### [52] 生化学のエネルギー学におけるATPの役割は何か？

熱力学の法則は、宇宙の全てのエネルギー変換に当てはまる、強力で有益なものだ。次に、生物のエネルギー通貨であるATPが関与する、細胞内の反応に、熱力学の法則を応用して見よう。

細胞は、化学的な仕事をするために必要な、自由エネルギーの獲得と移動に関して、アデノシン三リン酸すなわちATPを利用する。

ATPは、一種の“エネルギー通貨”として機能する。

すなわち、ある発エルゴン反応で放出された、自由エネルギーの一部を、ATPの形で獲得し、その分解で放出される、自由エネルギーを使って、吸エルゴン反応を進行させるのである。

### [53] ATPは細胞によって、いろいろな方法で産生され、いろいろな所で利用される。

ATPは、決して特殊な分子ではない。事実、細胞では、別の重要な利用法がある。

それは、核酸(RNA)合成の構成要素に変換され得る、ヌクレオチドとしての利用法である。(また、エネルギー通貨や核酸合成の構成要素の他に、ATPには、細胞外に分泌される神経伝達物質や、エネルギー代謝における重要な酵素の調節因子という役割もある。)

ATPは2つの特徴のために、細胞にとって、特に便利な分子である。1つは、加水分解された時に、比較的大量のエネルギーを放出することであり、もう1つは、多くの異なる分子を、リン酸化(リン酸基を付与すること)出来ることである。

[福永註 : タンパク質の形状を化学修飾するには、エネルギーの投入が不可欠。細胞がタンパク質を修飾する方法は、たくさんあるが、格段によく行われるのは、単純にリン酸基を付加することで、細胞内にある、全タンパク質分子のおよそ半分が1個以上のリン酸基を持っている。これに伴って、分子にATPからのリン酸基を付加する酵素、キナーゼも非常にたくさん存在する。]

### [54] ATPの加水分解で、エネルギーが放出される。

ATP分子は窒素性塩基であるアデニンが、リボース(糖質)に結合し、そのリボースに、3つのリン酸基が並んだものが結合している、分子である。

ATPの加水分解によって、自由エネルギーが放出され、ADP（アデノシンにリン酸）と無機リン酸イオン（このイオンは普通P iと省略される）が産生される。

すなわち、 $ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i + \text{自由エネルギー}$

この反応の重要な性質は、自由エネルギーを放出する、発エルゴン反応である、ということである。

■ATP分子のリン酸基間のP-O結合（リン酸無水物結合）の自由エネルギーは、加水分解の後で形成されるH-O結合のエネルギーよりも、遥かに大きい。

そのため、加水分解により、利用可能なエネルギーが放出される。

■リン酸は、マイナスに荷電し、互いに反発し合うので、リン酸同士を互いに近づけて、それらの間に共有結合を作らせる（例えばADPにリン酸を付加してATPを合成する）には、エネルギーを必要とする。

[55] ATPは、発エルゴン反応と吸エルゴン反応を、共役（きょうやく）させる。この共役は「代謝において、非常に普遍的なもの」である。

ATPの加水分解は、発エルゴン反応であり、ADP、P i、自由エネルギーを生み出す。

逆反応であるADPとP iからのATP産生は、吸エルゴン反応であり、ATPの加水分解で放出される自由エネルギーと同じ自由エネルギーを必要とする。

$ADP + P_i + \text{自由エネルギー} \rightarrow ATP + H_2O$

細胞内の多くの異なる発エルゴン反応が、ADPからATPへの変換に必要なエネルギーを供給出来る。

真核生物では、これらの反応の中で最も重要なものは、細胞呼吸である。

細胞呼吸では、燃料分子から放出された、エネルギーの一部が、ATPの形で獲得される。

ATPの産生と加水分解は、“エネルギーの共役サイクル”とも呼ぶべき、サイクルを構成し、このサイクルで、ADPは、発エルゴン反応からのエネルギーを受け取って、ATPになり、ATPは、吸エルゴン反応に対して、エネルギーを与える。

このATPサイクルは、どのようにして、エネルギーを獲得したり、放出したりする、のであろうか？ 発エルゴン反応は、ADPとP iからATPを合成する、吸エルゴン反応と共役している。

発エルゴン反応と、吸エルゴン反応の共役は「代謝において、非常に普遍的なもの」である。

ATPが産生される時、ATPは自由エネルギーを獲得し、それをP-O結合の形で保持する。

ATPは、次に、細胞内の別の場所に拡散し、そこで加水分解され、放出された自由エネルギーによって、吸エルゴン反応が駆動される。

このエネルギー共役サイクルの一例を示す。

グルタミンというアミノ酸の合成は、プラスの $\Delta G$ を持ち（吸エルゴン反応）、マイナスの $\Delta G$ を持つ（発エルゴン反応）ATPの加水分解から自由エネルギーを受け取らないと進行しない。

これら共役反応全体の $\Delta G$ （2つの $\Delta G$ を足し合わせたもの）はマイナスである。

このため、この2つの反応が共役する場合には、発エルゴン反応として進行し、グルタミンが合成される。

活発な細胞は、その生化学装置を駆動するために、毎秒数百万個のATP分子を必要とする。

ATP分子は、平均して合成されてから1秒以内に消費される。

安静時に、平均的な人は1日当たり、およそ40kg（人によっては体重と同じ位）のATPの合成・加水分解を行う。

これは、1個のATP分子が、合成・加水分解のサイクルを、毎日1万回繰り返していることを意味する。

## [56] 酵素とは何か？

ATPは極めて迅速に合成・消費される。しかしながら、これらの生化学反応は、酵素と呼ばれる触媒タンパク質の助け無しには、これほど迅速には進行しない。

ある反応の自由エネルギー変化 ( $\Delta G$ ) を知れば、その反応の平衡点が、どこにあるかを知ることが出来る。

$\Delta G$  がマイナスであればある程、反応の平衡は、完了に近い方に存在する。

しかしながら、 $\Delta G$  は反応の速度（反応が、平衡に向かって進行する速度）については何も語ってくれない。

**細胞がスピードを増加させるような、トリックを用いなければ、細胞内で起こる反応は遅すぎて、生命に寄与することは出来ない。**

このトリックを担うのが触媒である。触媒は、反応をスピードアップする物質であるが、その反応によって、変化させられてしまうことはない。

触媒は、それ無しには、起こらないような反応を、進行させることは出来ない。

単に、正反応と逆反応の両方の速度を増加させ、平衡が、より迅速に達せられるように働くだけである。

殆んどの生物触媒は、タンパク質であり、酵素と呼ばれる。

ここでは、タンパク質だけに焦点を当てるが、生物触媒（多分、生命の起源の中で、最も初期のものと考えられる）の中には、リボザイムと呼ばれるRNA分子も存在する。

タンパク質にしる、RNAにしる、生物触媒は、化学触媒作用が起きる鋳型である。

時間の経過と共に、タンパク質は触媒として進化して来た。その三次元構造は、非常に多様性に富むものとなり、多様な化学反応を触媒するようになった。

## [57] 反応が進行するためには、エネルギー障壁を克服しなければならない。

発エルゴン反応は、大量の自由エネルギーを放出し得るが、その反応の進行が極めて遅いこともあり得る。

反応の中には、反応物と産物の間に、エネルギー障壁が存在するために遅いものもある。

燃焼しているプロパンは、大量のエネルギーを放出するので、この反応は、プロトンと酸素が出会えば迅速に進行するようにも思える。

しかし、単にプロパンと空気を混ぜ合わせても、何も起こらない。

プロパンは、火花（エネルギー入力）によって、初めて、燃え始めるのである（ストーブの場合、このエネルギーは、マッチによって供給される）。

反応を始めるために、火花が必要であるということは、反応物と産物の間に、エネルギー障壁が存在することを示している。

一般的に、発エルゴン反応は、反応物に少量のエネルギーを与えることにより、エネルギー障壁を乗り越えさせて、初めて、進行するようになる。

このように、エネルギー障壁は、反応を開始するために必要なエネルギー量を表し、活性化エネルギー（ $E_a$ ）とも言う。

**[58] 化学反応においては、活性化エネルギーは、反応物を遷移状態種と呼ばれる、不安定な分子状態に変えるのに必要なエネルギーである。**

遷移状態種は、反応物や産物よりも高い自由エネルギーを持っている。

その結合は、引き伸ばされており、不安定である。

必要な活性化エネルギーは、反応によって異なるけれども、反応の自由エネルギー変化に比べると、小さいことが多い。

反応を開始するための、活性化エネルギーは、引き続いて起こる、反応の“下り坂”相の間に回収される。

従って、活性化エネルギーは、正味の自由エネルギー変化（ $\Delta G$ ）の一部ではない。

活性化エネルギーは、どこから来るのだろうか？

室温ないし体温に反応物が置かれた時、分子の一部は、動き回り、その運動の運動エネルギーを使い、エネルギー障壁に打ち勝って、遷移状態に入り、反応を開始するだろう。

しかしながら、この温度では、ごく少数の分子しか、これを達成するだけのエネルギーを、持たないだろう。

殆んどの分子は、活性化のための運動エネルギーを十分には持たず、反応はゆっくりとしか、進行しない。

もし、系の温度を高めれば、全ての反応分子は、より速く動き、より大きな運動エネルギーを持つようになり、反応はスピードアップするだろう。

しかしながら、十分に熱を加えて、分子の平均運動エネルギーを上昇させることは、生体系では、うまく行かない。

そのような、非特異的なアプローチは、全ての反応を促進し、タンパク質の変性などの、破壊的な反応をも促進させてしまう。

生体系で、反応をスピードアップする、もっと効率的な方法は、反応物同士を互いに近づけて、エネルギー障壁を低下させることである。

生きた細胞では、酵素が、この仕事を行う。

[59] 酵素は、特定の（特異的な）反応物分子を結合する。

触媒は、化学反応をスピードアップさせる。

殆んど非生物触媒は、非特異的である。

例えば、粉末プラチナは、分子状水素（ $H_2$ ）が反応物である場合、殆んど全ての反応を触媒する。

これとは対照的に、殆んど生物触媒は、特異性が非常に高い。

生物触媒である、タンパク質（酵素）やRNA（リボザイム）などの複雑な分子は、比較的単純な化学反応を触媒する。

酵素やリボザイムは、通常ただ1つの（もしくは、それと類似の少数の）反応物を認識し、その反応物としか結合しない。そして、1つの化学反応しか触媒しない。

以下では、酵素に焦点を当てるが、リボザイムにも、同様の化学法則が当てはまると考えて良い。

酵素によって触媒される反応では、反応物は、基質（substrate）と呼ばれる。

基質分子は、活性部位と呼ばれる、酵素上の特定部位に結合し、活性部位で、触媒反応が起こる。

酵素の特異性は、その活性部位の三次元構造によって、決定される。

三次元構造により、そこに、はまり込む基質が、決定されるからである。

他の分子（異なる形、異なる官能基、異なる性質を持つ）は、活性部位に入り込み結合することが出来ない。

酵素の活性部位に、基質が結合して、酵素-基質複合体（ $ES$ ）が形成される。

酵素と基質の結合は、水素結合、電気的誘引、共有結合などである。

酵素-基質複合体から、産物と遊離酵素が生じる。  $E + S = ES \rightarrow E + P$

$E$ は酵素、 $S$ は基質、 $P$ は産物であり、 $ES$ は酵素-基質複合体である。

遊離酵素（ $E$ ）は、反応の前と後で変化はない。

基質に結合している時は、化学的に変化している場合でも、反応が終わる時までには、元の形に戻っている。

酵素は、エネルギー障壁を低下させるが、平衡には影響を与えない。

反応物が、酵素-基質複合体の一部となっている時には、それに対応する、非触媒反応の遷移状態種に比べて、より少ない活性化エネルギーしか必要としない。

このように、酵素は反応のエネルギー障壁を低下させ、反応に、より安易な通り道を提供する。

酵素がエネルギー障壁を低下させる時、正反応と逆反応の両方共に、スピードアップするので、酵素によって触媒される反応は、非触媒反応に比べて、より迅速に平衡に達する。

最終平衡は、酵素があろうが、なかろうが、変わらない。

同様に、酵素を反応に加えても、反応物と産物の間の、自由エネルギー変化 ( $\Delta G$ ) は、変わらない。

酵素は、反応速度を大きく変化させる。

例えば、カルボキシル末端に、アルギニンを持つ、タンパク質分子が 600 個溶液中に存在する場合、そのタンパク質分子の無秩序さが増大し、次第に末端のペプチド結合は分解し、末端のアルギニンが放出される ( $\Delta S$ が増大する)。

7年後に、およそ半数 (300 個) のタンパク質が、この反応を終えているだろう。

しかしながら、カルボキシペプチターゼAという酵素が、この反応を触媒する場合には、0.5秒以内に、300 個のアルギニニンが放出されてしまう。

**[60] 酵素は、多数あって複雑だが、その多くはタンパク質でない他の“パートナー”を必要とする。その1つである補酵素は、ある種の酵素の機能に必要な炭素含有分子である。**

補酵素は通常、それが一時的に結合する酵素に比べると、小さい分子である。

NADは、触媒反応で、電子のキャリアー (伝達体) となる。

FADは、触媒反応で、電子のキャリアー (伝達体) となる。

ATPは、触媒反応で、エネルギーの供給/捕捉を担う。

補酵素は、酵素分子から別の酵素分子に移動して、基質から化学基を奪ったり、付加したりする。補酵素は、酵素に永久的に結合していないが、酵素と出会って、その活性部位に結合しなければならない、という点において、基質に似ている。

それに加えて、補酵素は、反応の過程で化学的に変化し、酵素から離れて、他の反応に参加する。

**[61] 酸化—還元反応 (レドックス反応) によって、電子とエネルギーが伝達される。**

ADPとリン酸からのATP合成は、吸エルゴン反応であり、発エルゴン反応からのエネルギーを抽出・保存できる。

エネルギーを伝達する、もう1つの方法は、電子伝達である。

ある物質が、他の物質に1つ以上の電子を伝達する反応を、「酸化—還元反応」ないしレドックス反応と呼ぶ。

■還元は、ある原子、イオン、分子による1つ以上の電子の獲得である。

■酸化は、1つ以上の電子の喪失である。

酸化と還元は、いつも電子の受け渡しという観点から、定義されるが、これらは水素原子 (水素イオンではない) の獲得・喪失という観点から、考えることも出来る。

何故なら、水素原子の伝達には、電子伝達が伴うからである ( $H=H^+ + e^-$ )。

ある分子が、水素原子を失う場合は、その分子は酸化される。

[62] 酸化と還元は、常に一緒に起こる。ある物質が酸化されると、その物質が失った電子は、他の物質に伝達され、その物質を還元する。

レドックス反応では、還元される反応物を、酸化剤と呼び、酸化される反応物を、還元剤と呼ぶ。グルコースの燃焼とグルコース代謝の両方で、グルコースは、還元剤（電子供与体）であり、酸素は、酸化剤（電子受容体）である。

レドックス反応で、エネルギーが伝達される。

もともと還元剤に存在していた、エネルギーの多くは、還元された産物に移行する（残りは還元剤に留まるか失われる）。

解糖系と細胞呼吸の重要な反応の幾つかは、非常に発エルゴニックなレドックス反応である。

[63] 補酵素NADは、レドックス反応における、重要な電子伝達体である。

ADPは、発エルゴン反応で放出されたエネルギーを獲得し、それを用いて、ATPを合成する反応（吸エルゴン反応）の補酵素と考えることができる。

同様に、補酵素NAD（ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド）は、レドックス反応における、電子伝達体として機能する。

NADは2つの化学的に異なる形で存在する。

酸化型（NAD<sup>+</sup>）と還元型（NADH + H<sup>+</sup>）である。

両者共に、生物のレドックス反応に関与する。 
$$\text{NAD}^+ + 2\text{H} \rightarrow \text{NADH} + \text{H}^+$$
式の上では、2つの水素原子（2H + 2e<sup>-</sup>）の伝達であるが、実際に伝達されるのは、2e<sup>-</sup> と 1H<sup>+</sup> であり、遊離のプロトン（H<sup>+</sup>）が残る。右辺のH<sup>+</sup>がそれである。

酸素は、非常に電気陰性度が高く、容易にNADHから電子を奪い取る。

酸素による、NADH + H<sup>+</sup> の酸化、

すなわち、 
$$\text{NADH} + \text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O}$$
（1/2O<sub>2</sub> の表記は、酸化剤として働くのが分子状酸素O<sub>2</sub>であることを意味する。） は、非常に、発エルゴニックな反応で、ΔGは-52.4 kcal/mol である。

1分子のATPが、およそ12 kcal/mol の自由エネルギーの束と考えることができるように、NADは、より大きな自由エネルギーのパッケージ（およそ50 kcal/mol）と考えることができる。

NADは、細胞内の一般的な電子伝達体であるが、唯一の電子伝達体ではない。

FAD（フラビンアデニンジヌクレオチド）も、グルコース代謝において電子を伝達する。

[64] 酵素活性は、どのように調節されているのだろうか？

複雑な生体の中で、一つ一つは、ただ一つ（ないしは少数）の反応しか触媒しない、無数の酵素が、

どのようにして、協働するのか。

生命の主要な特徴はホメオスタシス、すなわち、内的条件を安定に保つということである。細胞は、どのようにして、数千の化学反応が進行している間に、比較的一定な内部環境を維持するのであろうか？

これらの化学反応は、代謝経路の形で組織化され、代謝経路では、ある反応の産物は、次の反応の反応物となる。

これらの経路は、孤立して存在するのではなく、広範囲に相互作用する。

そして、個々の経路中の反応は、特異的な酵素によって触媒される。

細胞内あるいは個体内で、酵素は、ある代謝経路が機能するか否か、機能する場合は、どの程度機能するかを調節する。

代謝経路中の1つの酵素が不活性の場合、その酵素が触媒する反応のみならず、その反応の下流に位置する反応は、すべてストップする。

数千の異なる酵素の速度の制御は、生体内のホメオスタシス維持に寄与する。

生きた細胞では、酵素は、いろいろな方法で、活性化されたり、阻害されたりしている。

だから、酵素が存在するからといって、必ずしも、それが機能しているとは限らない。

酵素の中には、その反応速度によって、代謝経路全体の流量が決定されるような、重要な役割を果たしているものがあり、そのような酵素では、反応速度を調節する、独特のメカニズムが存在する。

また、環境、特に温度とpHが酵素活性に影響を及ぼす。

酵素は、阻害因子によって調節され得る。

多様な阻害因子が、酵素に結合して、酵素が触媒する、反応の速度を低下させる。

阻害因子の中には、細胞に、もともと存在するものもあるし、人工的なものもある。

天然の阻害因子は、代謝を調節するし、人工的な阻害因子は、病気の治療に用いられったり、病原体を殺したり、実験室で酵素の機能を研究するために用いられる。

**不可逆的阻害** : 阻害因子の中には、酵素の活性部位の、側鎖に共有結合し、正しい基質と相互作用する能力を破壊することにより、その酵素を永久に不活化するものがある。

**可逆的阻害** : 阻害因子の中には、酵素の活性部位に、可逆的に結合する点では、基質と似ているが、それが結合した酵素が、化学反応を触媒出来ないという点で、基質とは異なるものがある。そのような分子が、酵素に結合している間、基質は活性部位に近づけないから、結果として、そのような分子は、酵素の時間を浪費し、その触媒作用を阻害する。

このような分子は、競合的阻害因子と呼ばれる。

**非競合的阻害因子**：この非競合的阻害因子は、酵素上の活性部位とは異なる、部位に結合する。この阻害因子が、酵素に結合することにより、酵素の形が変化して、活性部位の構造も変化する。この場合は、活性部位には、基質分子が結合し得るが、反応速度は減少する。この阻害は、可逆的である。非競合的阻害因子が結合することによる、酵素の形の変化は、次のアロステリック効果の一例である。

[65] 酵素のアロステリック制御——アロステリック酵素は、その形を変えることにより、活性を制御する——

酵素の活性部位（基質結合部位）と立体構造上、異なる部位に、小さな分子が結合して、その活性が変わる現象をアロステリック効果と呼ぶ。

このような機能を持つ酵素（またはタンパク質）をアロステリック酵素（アロステリックタンパク質）、これらの活性（機能）が、小分子によって調節される現象を、アロステリック制御と呼ぶ。

アロステリック酵素で、より一般的なのは、細胞内で2つ以上の形を取り得る酵素の場合である。

■酵素の活性型は、基質結合に適した形をしている。

■酵素の不活性型は、基質を結合出来ないが、阻害因子を結合出来る、形をしている。

阻害因子が、活性部位（基質結合部位）とは異なる部位に結合すると、不活性型が安定化し、活性型に変換し難くなる。

■酵素の3番目の部位に、活性化因子が結合することにより、活性型が安定化する。

アロステリック酵素では、基質結合と同様に、阻害因子と活性化因子の結合も、非常に特異的なものである。

アロステリック制御を受ける、殆どどの（全てではない）酵素は、四次構造を持つタンパク質である。

すなわち、複数のポリペプチド性サブユニットから構成されている。

活性部位は、そのようなサブユニットのうちの1つに存在し、活性部位を持つサブユニットを、触媒サブユニットと呼ぶ。

活性化因子ないし阻害因子を結合する制御部位を持つのは、別のサブユニットであり、これらのサブユニットを調整サブユニットと呼ぶ。

アロステリック酵素と非アロステリック酵素は、基質濃度が低い時の反応速度が、大きく異なる。非アロステリック酵素の場合、基質濃度を増加させると、反応速度は、初めのうち、シャープに立ち上がるが、酵素が基質で飽和されるにつれて、次第に横ばいになり、一定の最大速度に近づく。

多くのアロステリック酵素の場合、カーブは全く異なるものになり、シグモイド（S字状）カーブになる。

基質濃度を増加させた場合、基質濃度が低い間は、反応速度の増加が微々たるものだが、ある濃度の範囲では、反応速度は、基質濃度の比較的小さな変化にも、極めて鋭敏に反応する。

この感度の高さのために、アロステリック酵素は、代謝経路全体の制御において、重要な役割を果たしているのである。

## [66] アロステリック効果が、代謝を制御する。

典型的な代謝経路は、出発材料があって、多様な中間産物があり、細胞にとって、何らかの目的で必要とされる、最終産物で終わる。

それぞれの経路には、たくさんの反応があり、それぞれの反応が、異なる酵素によって触媒され、中間産物を産生する。

**経路の第1番目のステップを方向決定段階と呼ぶ。**

一旦、この酵素によって触媒される反応が起きると、“ボールは転がり始め”、他の反応が、順番に起こって、最終産物の産生に至るからである。

しかし、例えば、ある産物が、作らなくても、環境から十分に得られるために、細胞がそれを産生する必要がない場合には、どうなるのだろうか？

細胞が必要としないものを作り続けるのは、エネルギーの無駄であろう。

細胞が、この問題に、対処する方法の1つは、最終産物が、方向決定段階を触媒する酵素を、アロステリックに阻害することによって、代謝経路をシャットダウンすることである。

この機構を、フィードバック阻害ないし最終産物阻害と呼ぶ。

最終産物が、高濃度に存在する場合は、それが、方向決定段階酵素のアロステリック部位に結合し、酵素を不活化する。

## [67] 酵素は、環境の影響を受ける。

殆どどの酵素反応の速度は、pHに依存する。

それぞれの酵素には、最大活性を発揮する、特定のpHがある。

その“理想的”（至適）pHよりも、酸性にしたり、塩基性にしたりすると、酵素活性は減少する。

一般的に、温度を上げると、酵素反応の速度は上昇する。

高温では、反応分子の大部分が、活性化エネルギーを供給するのに、十分な運動エネルギーを持っているからである。

しかし、あまり温度が高過ぎると、酵素は不活化される。

高温では、酵素分子は、高速で振動・回転し、非共有結合の一部が、壊れてしまうからである。

熱によって、三次元構造が変化すると、酵素は変性し、活性を失う。

酵素の中には、体温よりも、ほんの少し高い温度で、変性してしまうものもあるが、沸騰水中や氷点下でも、安定な酵素も存在する。 しかしながら、全ての酵素には至適温度がある。

## 7. 呼 吸

[68] 生物は、光合成によって作られた、食物から、エネルギーを得る。

生物は、消化過程で、食物をグルコースに変換する。

グルコースは、細胞のサイトソル（細胞質ソル）で起こる、解糖系で、3炭素化合物のピルビン酸に変換される。

ピルビン酸分子は、好氣的な細胞呼吸か、嫌氣的な発酵によって、代謝される。

正味の結果として、エネルギーは、ATP 分子に“捕獲”されて、生細胞の活動のエネルギー源となる。

■細胞呼吸 : ●完全な酸化 ●廃棄物は、 $H_2O$ 、 $CO_2$  ●捕獲されるエネルギーは、32分子のATP。

細胞呼吸は環境中の $O_2$  を利用し（好氣的代謝）、一連の代謝経路を通して、ピルビン酸分子を2分子の $CO_2$  にまで、完全に変換する。

その過程で、ピルビン酸の共有結合に保存されている、多量のエネルギーが放出され、ADP とリン酸からのATP 合成に用いられる。

■発酵 : ●不完全な酸化 ●廃棄物は、有機化合物（乳酸かエタノール）●捕獲されるエネルギーは、2分子のATP。

発酵は $O_2$  を利用しない（嫌氣的代謝）。

発酵により、ピルビン酸は、乳酸か、エチルアルコール（エタノール）に変換される。

これらは、未だ、比較的エネルギーに富む分子である。

グルコースの分解は不完全なので、発酵によって、放出されるエネルギーは、細胞呼吸によって、放出されるエネルギーに比べて、遥かに小さい。

[69] エネルギーの産生代謝経路は、 $O_2$ があるか、ないかで、異なる。

細胞のエネルギー獲得過程は、 $O_2$ があるか、ないかで、異なる代謝経路の組み合わせを用いる。

■ $O_2$  が、電子の最終受容体として、利用可能な場合は、4つの経路が働く。

先ず、前出の解糖系が働き、次に、まとめて細胞呼吸と呼ばれる、3つの経路が続く。

すなわち、ピルビン酸酸化、クエン酸回路、電子伝達鎖である。

■ $O_2$  が、利用できない場合は、ピルビン酸酸化、クエン酸回路、電子伝達鎖は、機能せず、解糖系によって生じた、ピルビン酸は、発酵によって、代謝される。

■解糖系、ピルビン酸酸化、クエン酸回路、電子伝達鎖の代謝経路は、細胞内の異なる部位で起こる。

原核生物 : [細胞質中] ⇒ 解糖系、発酵、クエン酸回路  
[細胞膜上] ⇒ ビルビン酸酸化、電子伝達鎖  
真核生物 : [ミトコンドリア外] ⇒ 解糖系、発酵  
[ミトコンドリア内] ⇒ 内膜 : 電子伝達鎖 ,  
マトリックス : ビルビン酸酸化、クエン酸回路

■解糖系 : 解糖系は、細胞のサイトソル（細胞質ゾル）で起こる。

解糖系により、6炭素のグルコースは、3炭素のピルビン酸に変換され、少量のエネルギーを産生するが、CO<sub>2</sub> は産生しない。

解糖系では、グルコース分子の炭素と水素の間の、共有結合の幾つかが、酸化されて、この糖質に保存されているエネルギーの一部が、放出される。

1分子のグルコースが、10種類の酵素によって触媒される反応を経た後の、解糖系の最終産物は、2分子のピルビン酸、正味2分子のATP、2組のNADH+H<sup>+</sup>である。

■ピルビン酸酸化 : ピルビン酸デヒドロゲナーゼによって、触媒されるピルビン酸から、アセチル CoA への酸化は、解糖系とクエン酸回路を結びつける反応である。

3炭素分子のピルビン酸は、酸化されて、2炭素のアセチル基になり、CO<sub>2</sub> が放出される。

この酸化で放出される、エネルギーの一部は、NAD<sup>+</sup>のNADH+H<sup>+</sup>への還元によって、捕捉される。残りのエネルギーの一部は、アセチル基とCoA との結合に、一時的に保存される。

解糖系で、1分子のグルコースから産生された、2分子のピルビン酸からは、2組のNADH+H<sup>+</sup> + 2分子のCO<sub>2</sub> が産生されることになる。

■クエン酸回路 : アセチル CoA は、そのアセチル基を、4炭素化合物のオキサロ酢酸に与えて、6炭素のクエン酸を合成する。

クエン酸は、生命の最も重要な、エネルギー獲得経路の1つである、クエン酸回路を開始する化合物である。

8つの反応からなる、クエン酸回路は、2炭素のアセチル基を、完全に酸化して、2分子の二酸化炭素にする。

これらの反応で放出される、自由エネルギーは、ADP と NAD<sup>+</sup>と FAD によって捕捉され、ATP、NADH+H<sup>+</sup>、FADH<sub>2</sub>に保存される。

解糖系をスタートした、1分子のグルコースから、クエン酸回路では、正味2分子のATP、6組のNADH+H<sup>+</sup>、2分子のFADH<sub>2</sub>、2分子のCO<sub>2</sub> が産生される。

■電子伝達鎖 : 解糖系とクエン酸回路からの、NADH+H<sup>+</sup>とFADH<sub>2</sub> が再酸化される。

NADH+H<sup>+</sup>とFADH<sub>2</sub>によって、運ばれた電子は、ミトコンドリア内膜の電子伝達体に受け渡される。

NADH+H<sup>+</sup>とFADH<sub>2</sub> から出る、4個のH<sup>+</sup>（プロトン）は、電子伝達体が、酸化で放出したエネルギーで、濃度勾配に逆らって、マトリックスから膜間腔へ汲み出す。

プロトンの汲み出しによって、膜間腔とマトリックスの間に、H<sup>+</sup>のアンバランス（電位差）が生じる。

そして、これらの膜間腔のプロトンが、膜を越えて、マトリックスに戻ってくる運動（化学浸透）が ATP 合成と共役している。

膜を貫通する酵素、ATP シンターゼが、化学浸透の運動エネルギーを利用して、ADP と Pi から、ATP を合成する。

最終的には、電子は、分子状酸素に受け渡され、酸素は、プロトンと電子を受け取り、水になる。解糖系をスタートした、1分子のグルコースから、電子伝達鎖では、正味 28 分子の ATP が産生され、6分子の酸素が、6分子の水になる。

■反応物と産物のまとめ : 解糖系から、ピルビン酸酸化、ピルビン酸酸化、クエン酸回路、電子伝達鎖に至るプロセスは、次の反応式によって表すことができる。



## 8. 代謝の熱力学と制御

[70] 代謝経路は、どのように関係し合い、制御されているのだろうか？

細胞が獲得したエネルギーが、細胞内で、どのようにして、互いに繋がりが合っている代謝経路の間を伝わっていくのか？

解糖系および細胞呼吸の経路は、代謝の他の経路から、独立して働いているのではない。それどころか、これらの経路間には相互交換がある。

すなわち、解糖系および細胞呼吸の経路と、他の代謝経路の間には、生化学的な物質の流れがあり、解糖系および細胞呼吸の経路は、アミノ酸、核酸、脂質、その他の生命の構成要素の合成および分解の経路と、密接に結びついているのである。

他の経路に由来する炭素骨格は、解糖系および細胞呼吸の経路に入り、分解されて、エネルギーを放出し（異化）、解糖系および細胞呼吸の経路から出た炭素骨格は、細胞の主要な高分子構成要素の合成材料となる（同化）。

異化と同化は、生物学的単量体の相互変換を伴う。

食物からの炭素骨格の三大要素は、糖質（ほとんどが多糖であるデンプン）、脂質（ほとんどがグリセロールに3個の脂肪酸が結合したトリグリセリド）、タンパク質（アミノ酸の重合体）である。

異化相互変換 : 多糖、脂質、タンパク質は、全て分解されて、エネルギーを供給することが出来る。

■多糖は、加水分解されてグルコースになる。

グルコースは、解糖系と細胞呼吸経路に入り、エネルギーは、NADH と ATP に捕捉される。

■脂質は、その構成成分である、グリセロールと脂肪酸に分解される。

グリセロールは、解糖系の中間体である、ジヒドロキシアセトンリン酸（DAP）に変換され、脂肪酸は、ミトコンドリアで、アセチル CoA に変換される。

どちらの場合も、二酸化炭素にまで、酸化されて、エネルギーが放出される。

■タンパク質は、加水分解されて、アミノ酸になる。

20 種の異なるアミノ酸は、解糖系やクエン酸回路の異なる個所で、これらの経路に入る。

例えば、グルタミン酸というアミノ酸が、クエン酸回路の中間体の、 $\alpha$ -ケトグルタル酸に変換される。

同化相互変換：多くの異化反応は、逆方向にも働くことができる。

解糖系およびクエン酸回路の中間体は、酸化されて二酸化炭素になる代わりに、還元されて、グルコース合成の材料にもなることができる。

この経路を糖新生と呼ぶ。

同様に、アセチル CoA から、脂肪酸が合成される。

アミノ酸は、逆反応によって産生され、重合して、タンパク質になる。

クエン酸回路の中間体の中には、多様な細胞構成成分の合成原料になるものがある。

例えば、 $\alpha$ -ケトグルタル酸は、プリン合成の出発材料であり、オキサロ酢酸は、ピリミジン合成の出発材料であるが、プリン、ピリミジンは、共に核酸の DNA、RNA の構成要素である。

$\alpha$ -ケトグルタル酸は、クロロフィル合成の出発材料でもある。

アセチル CoA は、多様な色素、植物の成長物質やゴム、動物のステロイドホルモンなど、いろいろな分子の構成要素になる。

[71] 異化と同化は、統合されている。

食物の中の、タンパク質由来の炭素原子は、いろいろな運命をたどり得るが、DNA になったり、脂肪になったり、二酸化炭素になったりもする。

細胞は、どのようにして、どの代謝経路をたどるかを“決定する”のだろうか？

これほど、たくさんの相互変換の可能性があるとすれば、多様な生化学的分子の細胞内濃度は、大きく変動するだろう、と考えたくなる。

例えば、細胞内のオキサロ酢酸濃度は、何を食べたか（食物分子の中には、オキサロ酢酸の原料となるものがある）、オキサロ酢酸が使われたかどうか（クエン酸回路やアスパラギン酸の合成で）に依存するだろうと考えられる。

驚くべきことに、これらの物質の、いわゆる“代謝プール”（細胞内の全ての生化学的分子の総量）中の濃度は、殆んど一定なのである。

細胞は、異化と同化の酵素を制御して、バランスを維持するのである。  
この代謝ホメオスタシスは、異常な状況下でしか乱されない。

そのような異常な状況の1つである、栄養不足を考察して見よう。

グルコースは、優れたエネルギー源である。  
既述したように、脂質とタンパク質も、また、エネルギー源となる。  
どれか1つ、あるいは、これら3つの全てが、体が必要とする、エネルギーを供給してくれる。

実際には、物事はそれほど簡単ではない。  
例えば、タンパク質は、体の中で、酵素や構成成分として、重要な役割を担っており、エネルギーのために貯蔵されている訳ではない。  
エネルギーのために、タンパク質を使うと、重要な反応のための触媒を失ってしまうことになる。

多糖と脂肪（トリグリセリド）には、そのような、触媒としての役割はない。  
多糖は、多少、極性があるので、大量の水を結合し得る。  
脂肪は、非極性物質なので、多糖ほどには、大量の水を結合しない。  
だから、水の中では、脂肪は多糖よりも軽い。  
それに加えて、脂肪は、糖質に比べて、より還元された物質であり（C-OH 結合に比べて、C-H 結合を多く持っている）、その結合中に、より多くのエネルギーを貯蔵している。

これら2つの理由から、脂肪は、多糖に比べて、より優れたエネルギー貯蔵の手段と言える。  
だから、ヒトは、1日分の食物のエネルギーに相当する分を、グリコーゲン（多糖）として、1週間分の食物のエネルギーに相当する分を、血中の利用可能なタンパク質として、1月分以上の食物のエネルギーに相当する量を脂肪として、蓄えているのは、驚くべきことではない。

もし、ヒトが、同化作用と生物学的活動に、必要な量の ATP と NADH を産生するために、十分な食物を摂取しない場合、どうなるだろうか？

体の中で、まず、最初に使われる貯蔵エネルギー源は、筋細胞と肝細胞に貯蔵されているグリコーゲンである。  
この貯蔵源は、長続きせず、次には、脂肪が使われる。  
脂肪酸が分解されると、アセチル CoA 濃度が上昇する。  
しかしながら、ここで、問題が生じる。  
脂肪酸は、血中から脳へは移行出来ないで、脳は、エネルギー源としては、グルコースしか利用出来ない。  
グルコースは、既に底をついているので、体は、脳のために、何か他のものを、グルコースに変換しなければならない。

この糖新生という経路は、殆んどの場合、タンパク質を分解して得られた、アミノ酸を原料とする。十分な食料が得られなければ、タンパク質（糖新生の材料として）および脂肪（エネルギー源として）を使わざるを得なくなる。

こうした飢餓状態が、数週間に及ぶと、貯蔵脂肪は底をつき、残された唯一のエネルギー源は、タンパク質だけとなる。

この時点で、筋肉のタンパク質や、感染と戦うために用いられる抗体など、の重要なタンパク質が、分解され始める。

このようなタンパク質が失われることにより、重度の病気がもたらされ、最終的には、死に至る。

[72] 代謝経路は、制御されたシステムである。

異なる代謝経路が、一緒に働いて、細胞と生物に、ホメオスタシスをもたらしている。

しかし、細胞は、どのようにして、これらの経路の間の、相互変換を制御し、一定の代謝プールを維持しているのだろうか？

パンに含まれるデンプンが、どうなるかを考える。

デンプンは、消化管で加水分解されて、グルコースになる。

グルコースは血流に入り、体全体に配分される。

しかしながら、その前に、調節のためのチェックが行われる。

体の需要を充たすのに、十分な血中グルコースが、既に存在しているのではないか？

もし、存在していれば、余分なグルコースは、肝臓でグリコーゲンに変換されて貯蔵される。

もし、食事によって、十分なグルコースが供給されなければ、グリコーゲンが分解されるか、他の分子が、糖新生によってグルコースに変換される。

以上のような、制御の結果、血中のグルコース濃度（血糖値）は、一定に保たれる。

グルコースの相互変換には、多くの反応が関与し、こうした反応は、酵素によって触媒され、調節ポイントは、これらの酵素であることを銘記してほしい。

解糖系、クエン酸回路、電子伝達鎖は、関与する酵素のアロステリック制御によって調節されている。

既述のように、代謝経路では、後に続く反応の産物が、高濃度に存在すると、上流の反応を触媒する酵素は阻害される。

一方で、ある経路の産物が、過剰に存在すると、その合成が抑制されて、それが、他の経路の反応をスピードアップし、原材料を、最初の産物の合成から、別の経路へと振り替える。

これらの、ネガティブフィードバック調節機構と、ポジティブフィードバック調節機構は、エネルギー獲得経路の、多くの箇所で用いられている。

■解糖系の主要調節ポイントは、酵素ホスホフルクトキナーゼである。

この酵素は、ATP（アデノシン三リン酸）によって、アロステリックに抑制され、ADP（アデノシン二リン酸）もしくはAMP（アデノシン一リン酸）によって、アロステリックに活性化される。

発酵が進行して、比較的少量のATPが産生される間は、ホスホフルクトキナーゼは、全活性を発揮する。

しかし、細胞呼吸によって、発酵の16倍のATPが産生され始めると、豊富に存在するATPが、この酵素をアロステリックに抑制し、フルクトース6-リン酸からフルクトース1,6-ビスリン酸への変換と、グルコース利用の速度は、減少する。

■クエン酸回路の主要調節ポイントは、イソクエン酸を、 $\alpha$ -ケトグルタル酸に変換する、酵素イソクエン酸デヒドロゲナーゼである。

NADH+H<sup>+</sup> とATPが、この反応のフィードバック阻害因子である。

ADPとNAD<sup>+</sup>活性化因子である。

もし、過剰なATPが蓄積すると、あるいは、NADH+H<sup>+</sup>が、電子伝達鎖で消費されるよりも、速く産生されると、イソクエン酸の変換は遅くなり、クエン酸回路は、実際上シャットダウンする。豊富に存在するATPとNADH+H<sup>+</sup>によって、アセチルCoAからクエン酸への変換が、遅くならないければ、大量のイソクエン酸とクエン酸が蓄積してしまう。

過剰なクエン酸は、解糖系の初期反応を触媒する、ホスホフルクトキナーゼに対して、フィードバック阻害因子として作用する。

その結果、もし、豊富にATPが存在する結果として、（酸素欠乏の結果としてではなく）クエン酸回路の回転が遅くなると、解糖系の速度も遅くなる。

ATPの濃度が低下して、再び必要になった場合には、クエン酸回路も解糖系も、再び活動するようになる。

アロステリック調節が、両者のバランスを取るように働く。

■もう一つの調節ポイントは、アセチルCoAが関与する。

もし、過剰なATPが産生され、クエン酸回路がシャットダウンした場合は、蓄積したクエン酸は、アセチルCoAを、貯蔵用の脂肪酸合成に振り向ける、ように働く。

これは、食べ過ぎの人が脂肪を蓄積する理由の1つである。

これらの脂肪酸は、後で代謝されて、更に多くのアセチルCoAを産生するようになる。

■最終的な調節ポイントは、細胞分化と共に生じる。

例えば、PPAR $\delta$ という、単一のタンパク質が、筋肉の遅筋線維の増殖を調節している。

これらの細胞は、ミトコンドリアに富み、脂肪と糖質を好氣的に異化する。

その結果、定常的に ATP が産生され、その加水分解によって、筋肉が、持続的に活動出来るようになる。長距離走は、肥満に打ち勝つ、良い方法なのである。

## 9. 光合成の進化—その有力な仮説—

[73] LUCA(ルカ)の愛称で知られる、「最後の共通祖先」(Last Universal Common Ancestor)の特性を構築する。

あらゆる生物に共通の特性をリストアップすれば、LUCA(ルカ)という愛称で知られる、「最後の共通祖先」(Last Universal Common Ancestor)の特性と思しきものを、再構築出来るのだ。

すると、例えば、光合成の出来る細菌は、ほんの一部に過ぎないから、LUCA が、光合成をしていた可能性は低い。

光合成をしていたのなら、子孫の大多数が、貴重な能力を捨て去ったのでなければならず、それは絶対がない、とまでは言えないが、有りそうにないとは言える。

一方、地球上の全生命に、共通の特性もある。

あらゆる生物は、細胞で出来ている(ただしウィルスは、細胞内でしか働けないので除く)。

それに、DNA からなる遺伝子を持ち、個々のアミノ酸を示す普遍的なコード(暗号)によって、タンパク質を指定している。

更に、どの生物も ATP(アデノシン三リン酸)という、共通のエネルギー通貨を持っており、それが、10 ポンド紙幣のような役目を果たすお陰で、細胞に関わる、有りとあらゆる仕事に対して「支払い」が出来る。

このため当然、あらゆる生物は LUCA という、その遠い共通祖先から、同じ特性を受け継いだと推測出来るのである。

[74] 今日の全ての生命は、代謝反応にも、共通の核心となるものを持っている。

それは、クエン酸回路(クレブス回路)という小さな反応回路。

近年の医学研究から、クエン酸回路は、細胞の生理や生化学反応の中心にあることが、明らかになっている。

クエン酸回路の進行速度の変化は、加齢からガン、更に、エネルギー状態まで、あらゆるものに影響を及ぼす。

しかし、それ以上に、大きな驚きをもたらしたのは、クエン酸回路が、反対にも進行出来る、という事実である。

通常、この回路では、(食物からの)有機分子が消費され、水素(呼吸で酸素と一緒に燃やすことになる)と、二酸化炭素が放出される。

従って、この回路は、代謝経路のための前駆体を提供するだけでなく、ATPとしてエネルギーを生み出すのに必要な水素を少しずつ与えてくれもする。

一方、クエン酸回路は、逆転もする。

二酸化炭素と水素を取り込んで、生命の基本的な構成要素である、有機分子を新たに生み出すのだ。

そして、エネルギーを放出する代わりに、逆転する回路は、ATPを消費する。

この回路にATPと二酸化炭素と水素を与えると、生命の基本的な構成要素を、魔法のように生み出すのである。

このクエン酸回路の逆転は、細菌でも一般的ではないが、熱水噴出孔に棲む細菌では、比較的よく見られる。

これは、明らかに、二酸化炭素を、生命の構成要素に変える、原始的であるが重要な手立てなのだ。

イエール大学の先駆的な生化学者ハロルド・モロウィッツは、数年前から、この逆転したクエン酸回路の特性を明らかにして来ている。

大まかに言って、彼の結論は、全ての素材の濃度が十分にあれば、回路はひとりでに進行するというものだ。

つまり、技術や厳密さを必要としない、化学反応なのである。

ある中間体の濃度が高まると、次の中間体へ連続的に変わって行き易い。

有りとあらゆる有機分子のうち、クエン酸回路のものは、最高に安定しているので、特に、形成され易い。

別の言い方をすれば、クエン酸回路は遺伝子が「生み出した」のではなく、確率論的な化学と熱力学の現象なのである。

その後、遺伝子が生まれると、それは、既に出来上がっていた楽譜を指揮した。

クエン酸回路が進行して、エネルギーの元が供給される際には、副反応も、ほぼ必ず起きて、アミノ酸や塩基など、もっと複雑な前駆体が生み出される。

地球上の生命の中核的な代謝のうち、どれ位が、自発的に生じ、どれ位が、遺伝子やタンパク質によって、後に、生み出されたものなのか、という問題は、興味深いだが、ここでは、扱い切れない。それでも、一つ、一般的なことを言っておきたい。

生命の構成要素を合成しようとする、これまでの企ての大多数は、「純粹」過ぎた。

そうした企てでは、まず、われわれの知る、生命の化学的組成とは無関係（それどころか生命に有害）の、シアン化物のような、単純な分子を用意し、圧力や温度や放電などの因子——どれも完全に非生物学的なパラメータ——をいじって、生命の構成要素を合成しようとしている。

ところが、出来れば、マイク・ラッセルが提案したような、電気化学的な反応装置で、クエン酸回路の分子と多少の ATP から始めたら、どうなるだろうか？

あの角の折れた代謝マップの中で、どれだけの物質が、こうした素材から、自発的に生じるのだろうか？ かなり、たくさんあるのではないか、と思うのは、私だけではない。

ひょっとしたら、自然選択が作用し出すような、小さなタンパク質（厳密に言えばポリペプチド）や RNA のレベルまで出来るかも知れない。

しかしながら、どれであれ、実現するためには、魔法の素材 ATP が、巧く安定的に、生み出されなければならない。

[75] ATP は、普遍的な（エネルギー）通貨というより、むしろ、値の融通が利かない、10 ポンド紙幣のようで、小銭などというものが、ないのである。

飲み物の値段が2ポンドであっても、10 ポンド紙幣でしか払えず、それなのに、お釣りがもらえない、といった状況だ——ATP 分子に、5分の1個など、ないのである。

そうすると、水素と二酸化酸素の反応で、放出されるエネルギーを取り込む場合、言わば、10 ポンド単位でしか、貯えられないことになる。

例えば、その反応で、理論上18ポンド得られるとしよう。

しかし、それでは、ATP を2個生み出すには足りないので、1個しか生み出せない。

小銭など、ないから、8ポンド分は無駄になってしまう。

すると、結局、本来なら2ポンド払うだけで、反応が進んで、18ポンドの見返りが得られる所が、10ポンド紙幣しか使えないと、10ポンドを払って、10ポンド得るだけになる。

細菌も、この方程式から逃れられない。

ATP だけを使った、水素と二酸化炭素の直接的な反応では、生育出来ないのだ。

それなのに、生育しているのは、10ポンド紙幣を、小銭に崩す、巧みな手法のお陰である。

この手法は、「化学浸透」という、いかつい名前でも知られ、これを、いち早く説明した、イギリスの一風変わった生化学者ピーター・ミッチェルは、1978年に、ノーベル賞を受賞して、今や、ミッチェルの発見が、20世紀で、最高に重要な発見の一つ、と評価されている。

それでも、長いこと、化学浸透の重要性を訴えている、数少ない研究者にさえ、そうした特異なメカニズムが生命に遍在する訳は、なかなか説明出来ない。

遺伝コードが共通なのと同様、クエン酸回路や、ATP や、化学浸透も、全生命に共通しており、最後の共通祖先（LUCA）が持つ特性だったように思われる。

その理由を、ビル・マーティンとマイク・ラッセルが説明している。

[76] 非常に大雑把に言って、化学浸透とは、プロトン（陽子）が、膜を通り抜けて移動する現象のことだ（だから、水が膜を通り抜ける移動を意味する「浸透」という言葉が入っている）。

細胞呼吸では、これが起きている。

電子が、栄養物から剥ぎ取られ、一連の運搬体を経て、酸素に渡されるのである。

数か所で放出される、エネルギーは、膜を通して、プロトンを汲み出すのに使われる。

その結果、膜を挟んで、プロトン勾配ができる。

この時、膜は、水力発電用のダムにも似た、振る舞いをする。

高所の貯水湖から流れ落ちる水が、タービンを回して発電するように、細胞では、プロトンの流れが、膜内にあるタンパク質のタービンを通して、ATPの合成を行わせるのだ。

このメカニズムは、全く予想外のものだった。

2分子間で、うまい具合に、そのまま反応を起こすのでなく、特異なプロトン勾配が、仲介するのである。

化学者は、整数で考えるのに慣れていて。

1個の分子が、2分の1個の分子と反応することは出来ないのだ。

ひょっとしたら、化学浸透で、何より面食らうのは、分数がよく現れる点かも知れない。

1個のATPを生み出すのに、何個の電子を、運ぶ必要があるか？

8個と9個の間だ。

では、プロトンは、何個？

これまでの、最も正確な見積もりでは、4.33個である。

そのような数は、勾配の中間段階が、知られるまで、全く説明が付かなかった。

実の所、勾配の段階は、無数にある。

整数に、分けられないのだ。

そして、勾配の持つ大きな利点は、一つの反応を、何度も繰り返して、1個のATP分子が出来る所にある。

ある反応で、ATPを1個生み出すのに必要なエネルギーの、100分の1が放出されるとしたら、その反応を、100回繰り返せば、勾配が少しずつ大きくなり、遂には、1個のATPを生み出せる程のプロトンが貯まる。

細胞には貯蓄が出来、小銭で一杯になる、ポケットがあるのだ。

これは、つまり、どういうことだろう？

水素と二酸化炭素の反応へ、話を戻そう。

細菌が、この反応を開始するのに、ATPが1個要することは、変わらないが、今度は、ATPを1個より多く生み出せる。

2個目のATPの生成へ向けて、貯蓄が出来るからだ。

贅沢な暮らしは出来ないかも知れないが、慎ましくは暮らせる。

もっと、率直に言えば、これは、生育の可能性はあるか、ないか、の分かれ目だ。

マーティンとラッセルが、正しくて、最初期の形態の生命は、この反応によって生育した、としたら、生命に、深海の熱水孔からの離脱を可能にした、唯一の手立ては、化学浸透だった、ことになる。

確かに、今日、この反応によって生きる生命は、化学浸透を利用しており、また、それなくして、生育出来ない。

それに、地球上のほぼ全ての生命が、必ずしも、要るものではなくても、この同じ興味深いメカニズムを持っていることも、確かだ。

何故なのか？

それ無くして、生きられなかった、共通の祖先から受け継いだために、他ならないのではなかろうか。

[77] しかし、マーティンとラッセルの主張が、正しいと思われる、最大の根拠は、プロトンの利用にある。

実際、何故、ナトリウムや、カリウムや、カルシウムのイオン、ではないのだろうか？

われわれの神経系では、それらが、使われていると言うのに。

勾配を設けるのに、他のタイプの荷電粒子よりも、プロトンを選ぶべき、明白な理由はないし、プロトンでなく、ナトリウムの勾配を生み出す細菌も、稀にはあるが、存在する。

主な理由は、ラッセルが主張した、熱水孔の特性まで、遡ることになると思う。

熱水孔が、二酸化炭素の溶存によって、酸性になっている海に、アルカリ性の流体を吐き出すことを、思い出してもらいたい。

酸は、プロトンの存在を基に、定義される。

プロトンが多いのが、酸で、少ないのが、アルカリなのだ。

従って、酸性の海に、アルカリ性の流体が、吐き出されると、天然のプロトン勾配が生じる。

言い換えれば、ラッセルの言う、アルカリ熱水孔にある、鉱物の「細胞」は、自然に、化学浸透の状態になっているのである。

ラッセル自身、何年も前に、これを指摘していたが、細菌が、化学浸透無しには、熱水孔を離脱出来なかった、と気付いたのは、微生物のエネルギー特性を調べた、マーティンとの協力の賜物だった。

すると、こうした電気化学的な反応装置は、有機分子や ATP を生み出すだけでなく、熱水孔からの脱出計画——10 ポンド紙幣の問題を回避する手立て——も提供してくれる訳である。

もちろん、天然のプロトン勾配は、生命が、その勾配を利用出来、その後、それ自身の勾配をも、生み出せる場合にのみ、用をなす。

ゼロから勾配を生み出すより、既存の勾配を利用する方が、簡単なのは確かだが、どちらにしても、すんなりとは行かない。

このようなメカニズムが、自然選択によって進化を遂げたことは、間違いない。

現在なら、遺伝子によって指定される、多数のタンパク質が必要だが、そんな複雑なシステムが、タンパク質も遺伝子——DNA で構成された遺伝子——も無しに、誕生出来たと考えられる訳がない。

すると、これは、興味深い堂々巡りとなる。

生命は、それ自身の化学浸透による、勾配の利用法を身に付けるまで、熱水孔から離れられなかった訳だが、それ自身の勾配の利用は、遺伝子や DNA を使って、初めて、可能になったのだ。

それでは、熱水孔からの離脱は、不可能に見えてしまう。

生命は、(熱水孔という) 石の孵化場の中で、驚くほどの複雑さを生み出した、のでなければならぬ。

こうして、地球上の全生命にとっての、最後の共通祖先が、途方もない姿として描ける。

マーティンとラッセルが正しい、としたら (私は正しいと思うが)、

この共通祖先は、自由生活性の細胞ではなく、石の迷路のような鉱物の「細胞」で、触媒の役目を果たす壁が、鉄と硫黄とニッケルで出来、天然のプロトン勾配が、エネルギーを与えていることになる。

最初の生命は、複雑な分子やエネルギーを生み出す、多孔質の岩石で、直ぐに、タンパク質や DNA の生成にまで、至ったのだ。

**[78] 酸素は、惑星の生命の鍵を、握っている。**

**光合成の廃棄物に過ぎない酸素が、実は、世界を作り出す、分子となるのだ。**

それは、光合成によって猛烈な勢いで放出され、やがては、惑星が吸収する能力を、圧倒するまでになる。

そして、終いには、塵、岩石中の鉄、海水中の硫黄やメタンなど、酸化され得るものが、全て酸化され、遊離酸素が、大気や海に溢れ出す。

そこまで来ると、酸素は、惑星から水が無くなるのを、阻止する。

水から解き放たれた水素は、宇宙へ抜け出す前に、豊富な酸素に、ぶつかるのを避けられない。

すると、直ぐ様、反応を起こして、また水になり、雨となって、空から落ち、海が無くなるのを食い止める。

こうして、酸素が大気中に溜まると、オゾンのシールドが出来、猛烈に強い紫外線を遮って、世界をより住みやすい場所にするのだ。

酸素は、惑星の生命にとって、救いとなるだけではない。

あらゆる生命に、エネルギーを与え、大型化を促しもする。

細菌は、酸素が無くても、問題なくやっていける。

電気化学反応において、比類なき能力を発揮し、ほぼ、どんな分子をも反応させて、僅かなエネルギーを掻き集められるのだ。

しかし、発酵によって、あるいは、メタンや硫酸塩などの2分子の反応によって、得られるエネルギーの総量は、酸素呼吸——食物を酸素と共に、文字通り燃焼させ、すっかり酸化させて、二酸化炭素と水蒸気にするプロセス——の能力に比べれば、取るに足りない。  
動物も植物も全て、ライフサイクルの最低でも一部は、酸素に頼っている。

[79] 光合成と呼吸は、同じだが、向きが反対のプロセスだ。

一言で言って、光合成は、二酸化酸素と水という、単純な二つの分子から、有機分子を合成し、必要なエネルギーは、日光からもらう。  
呼吸は、これと正反対のことを行う。

われわれは、体内で有機分子（食物）を燃やし、大気中に、二酸化炭素と水を放出している。  
更に、放出されるエネルギーが、われわれの生の原動力となる。  
われわれのエネルギーは、全て、太陽光が、食物に封じ込まれた状態から、解き放たれたものなのである。

光合成と呼吸は、化学反応のプロセスだけでなく、地球規模の収支を考えても、正反対だ。  
呼吸が無かったなら（植物を食物として消費する、動物や真菌類や細菌が存在しなかったら）、二酸化炭素は、遙か昔に、大気から吸い尽くされ、バイオマス（生物体）に転化されていただろう。

[80] 何故、「酸素発生型」が、生まれたのか。

光合成そのものは、原材料に、水が必要な訳でもない。  
われわれは、皆、身の回りにある形態の、光合成に馴染みがある。  
草木や海藻は、全て、基本的に、同じやり方で酸素を放出している。  
「酸素発生型」光合成というプロセスだ。

しかし、何歩か下がって、細菌を考えると、他にも、たくさん選択肢がある。  
割と原始的な細菌の中には、水の代わりに、溶存する鉄や硫化水素を利用するものもいる。  
これらが、原材料として有り得ないように思えるとしたら、それは、われわれが、酸素の豊富な世界——「酸素発生型」光合成の産物——に慣れ過ぎて、最初に光合成が生まれた、初期の地球の条件をなかなか想像出来ないために他ならない。

光合成で利用される、太陽エネルギーは、水を水素と酸素に分解する。  
これは、海の水が、紫外線の放射で散らされて、宇宙へ漏れ出る時に、惑星規模で起きる反応と、変わらない。  
光合成が成し遂げている——そしてわれわれが未だ成し遂げていない——のは、猛烈な紫外線や宇宙線ではなく、穏やかな太陽光を用いて、最小限のエネルギーで、水から水素を剥ぎ取れるような、触媒を見つけることだ。

これまでの所、われわれ人類は、創意工夫をしながら、結局、水の分解によって得られる以上の、エネルギーを、その分解に消費している。

水から水素を穏やかに取り出す、単純な触媒で、光合成を模倣することに成功したら、世界のエネルギー危機は解決してしまうだろう。

その水素を燃やせば、世界のエネルギー需要を、全て楽に満たせ、廃棄物として、ただ、水が、また生まれるだけだ。

環境汚染はなく、二酸化炭素も排出せず、地球温暖化も起きない。

だが、これは、た易い仕事ではない。

水を構成する原子の結合は、すばらしく、安定したものだからだ。

それは、海も証明する通りで、どんなに猛烈な嵐で、波が崖に打ちつけても、水は、原子にまで、分解しない。

水は、この惑星で、一番どこにでも有りながら、手強い原材料なのである。

現代の船乗りも、水と少しの太陽光で、船を動かす手立てのこととなると、考え込んでしまうだろう。波間に浮かぶ、緑藻にでも訊くしかない。

もちろん、同じ問題に、緑藻の遠い祖先、つまり、今日のシアノバクテリアの祖先も直面した。

彼等は、地球上で、水を分解する手口をたまたま見つけた、唯一の生命形態だった。

不思議なのは、自らの親類に当たる、細菌が、硫化水素を分解したり、鉄を酸化したりするのと、まるっきり同じ理由で、シアノバクテリアが、水を分解していることだ。

彼等が欲しいのは、電子だ。

そして、見た所、水は、それが最も得られそうにない、場所に当たる。

**光合成は、理論上は単純なもので、要は、電子の問題である。**

二酸化炭素に幾つか電子を加え、電荷のバランスを取るために、幾つか陽子（プロトン）も加えると、あら不思議、糖ができる。

糖は有機分子であり、われわれの、あらゆる食物の元は、結局の所、これだ。

しかし、電子の出所は、どこなのか？

太陽からの、僅かなエネルギーで、ほぼ、どこからでも電子は得られる。

馴染み深い「酸素発生型」の光合成の場合、電子は水から得られるが、実は、水より不安定な、他の化合物から剥ぎ取る方が遥かに易しい。

硫化水素から電子を取り出せば、大気中に酸素が放出される代わりに、元素状態の硫黄が析出する。海中に（2価の鉄イオンとして）溶存する、鉄から取り出せば、赤錆の元である、3価の鉄イオンが出来、新たな岩石を形成して沈殿する。

かつて、このプロセスが、莫大な「縞状鉄鉱層」を生み出したと、考えられている。

縞状鉄鉱層は、世界中で見つかっており、今では、低品位の鉄鉱が、最も多く貯蔵された場所となっている。

こうしたタイプの光合成は、酸素の豊富な、今日の世界では目立たない。

それは、硫化水素や、溶存した鉄といった原材料が、日光が良く当たり、酸素に十分曝された水には、めったに見つからない、からに他ならない。

しかし、遊離酸素が増加する前、地球が、未だ若かった頃には、それらの原材料は、電子の供給源として、圧倒的に手に入れ易く、海に飽和していた。

これにより提起される、パラドックスの解決は、光合成が誕生した、プロセスを知る上で、欠かせない。

何故、電子の供給源として、当時は、たくさんあって、しかも、楽に使えたものから、水という、遥かに厄介なものへ、切り替わったのだろうか？

どんな環境の圧力、あるいは変異なら、そうした切り替えを、もたらせたのだろうか？

### [81] シアノバクテリアの起源を探る。

「事実」という言葉が、生物学者を、おののかせるのは、どんな規則にも、多くの例外があるからだ。ところが、そんな「事実」の一つは、酸素発生型光合成については、ほぼ確実である。酸素発生型光合成は、一度だけ、誕生したのだ。

光合成の部位となる葉緑体は、あらゆる植物・藻類の、全ての光合成細胞に見つかる。

葉緑体は、遍く、存在し、間違い無く、どれも、互いに縁続きなのだ。

どれも、知られざる共通の歴史を持つ。

その過去を知る、手掛かりは、サイズと形にある。

葉緑体は、宿主細胞の中に棲む、小さな細菌に似ているのである。

細菌が、祖先ではないか、というこの示唆は、どの葉緑体にも、独立した環状の DNA があることによって、裏付けられている。

この環状の DNA は、葉緑体が細胞分裂を起こす度に、複製され、細菌と同じように、分裂して出来る、娘細胞のそれぞれに渡る。

葉緑体の DNA の、具体的な文字列は、細菌との繋がりを裏付けるだけでなく、原生生物では、シアノバクテリアが、最も近いことを示している。

大事なことを、一つ言い忘れていたが、植物の光合成における、Z 機構は、その5つの構成要素もろとも、既に、シアノバクテリアに（もっと単純なメカニズムではあるが）、すっかり垣間見えている。

結局の所、葉緑体が、昔は、自由生活性のシアノバクテリアだったことは、間違いない。

かつて、「藍藻」という、趣のある名を、間違っつけられていた、シアノバクテリアは、「酸素発生」型の光合成によって、水を分解できるものとして、唯一、知られている細菌の仲間だ。

その一部が、一体、どうやって、宿主細胞内に棲み付くようになったのかは、長大な、地質学的時間の、とばりに包まれた、謎である。

それが、10 億年以上も昔に、起きたのは間違いないが、恐らく彼等は、ある時に、飲み込まれ、消化を免れて（珍しいことではない）、やがて、宿主細胞の役に立つようになったのだろう。

シアノバクテリアの入った宿主は、藻類と植物という、二つの大帝国の礎を築くことになった。現在の藻類や植物は、寄生者となった細菌から、受け継いだ、光合成のシステムを利用し、太陽と水によって、生きる能力を持つのである。

すると、光合成の起源を探ると、水の分解の問題を解決した、唯一のタイプの細菌、シアノバクテリアの起源を探ることになる。

そして、この探求は、現代の生物学において、最高に物議を醸し、実は、未だ、決着の付いていない話の一つなのだ。

2006 年には、ボブ・ブランケンシップの率いる、小さなチームが、二つの光化学系が、細菌で非常に良く保存されていることを、明らかにした。

様々な細菌の間には、莫大な進化距離〔訳注：進化に伴って生じた、相違の度合いのことで、DNA の塩基置換の回数で計られる〕があるが、光化学系の中核的構造は、ほぼ同じであり、コンピュータ・グラフィックスで空間的に重ね合わさる程だ。

更に、ブランケンシップは、長いこと、研究者が「存在するのではないか」と思っていた、もう一つの結びつきも確かめた。

二つの光化学系（光化学系ⅠとⅡ）も、中核的構造が共通で、大昔に、共通の祖先から進化を遂げたのは、ほぼ間違いないのである。

つまり、かつて、光化学系は一つだったのだ。

ある時点で、遺伝子が複製され、そっくり同じ、二つの光化学系になった。

それらは、自然選択の影響を受けて、ゆっくりと、別々になって行ったが、構造は良く似たまま、保たれた。

やがて、この二つの光化学系は、シアノバクテリアの Z 機構において、繋ぎ合わさり、その後、植物や藻類の葉緑体に渡った。

**[82] ところが、この単純な話では、興味深いジレンマが、覆い隠されてしまう。原初の光化学系が、ただ複製されても、酸素発生型光合成の問題は解決出来ないのだ。**

それだけでは、電子を強く引き抜くものが、強く押し込むものと繋がる形にはならない。

光合成が、起きるようになる前に、二つの光化学系が、逆方向へ分かれて、進化を遂げなければならず、そうやって初めて、この二つは繋がりが合って、機能出来るのだ。

従って、こんな疑問が生じる。

どのように、出来事が続けば、二つの光化学系が、分かれて行き、親密だが、正反対のパートナー

として、結局は、また、結びつくようになるのだろうか？

その答えを見つける、最良の手立ては、光化学系そのものに、目を向けることだ。

二つの光化学系は、シアノバクテリアの Z 機構で結びついているが、それ以外では、興味深いことに、進化の過程が異なる。

光化学系が、そもそも、どの段階で生まれたかは、一旦さて置いて、細菌の世界に、現在、どう広まっているかを、簡単に見てみよう。

シアノバクテリアを除けば、二つの光化学系は、一つの細菌に同居して見つかりは、しない。

あるグループの細菌には、光化学系 I しかなく、別のグループには、光化学系 II しかない。

どちらの光化学系も、単独では、別々の目的で働いており、まさに、その仕事が、酸素発生型光合成の誕生したプロセスについて、素晴らしい知見を与えてくれる。

細菌でも、光化学系 I は、植物での場合と、全く同じ仕事をしている。

細菌の光化学系 I は、無機物から電子を引き抜き、分子の「ストリートマジシャン」を作って、二酸化炭素に電子を押し込み、糖を作る。

植物と違うのは、電子の供給源が、無機物である点だ。

光化学系 I は、自分には扱えない、水ではなく、遥かに、標的にし易い、硫化水素や、鉄から電子を引き抜く。

なお、光化学系 I が作る、分子の「マジシャン」である、NADPH も、既述の熱水噴出孔などで、純粋に化学的に、作り出せる。

この場合も、NADPH は、植物の光合成と同様の、反応群によって、二酸化炭素を、糖に変える。そのため、光化学系 I が、唯一成し遂げた、真の意味での革新は、それまで、化学的作用だけで、なされていた仕事をするのに、光を利用したことだった、のである。

ここで、光を、化学的作用に変える能力は、殊更、特別な訳ではないことも、言うて置く必要があろう。

ほぼ、どんな色素にも、そういう能力があるのだ。

色素の化学結合は、光子を良く吸収できる。

色素が、光子を吸収する時、色素の持つ電子が、一気に高いエネルギー準位へ持って行かれ、近くの分子に、捕らえられ易くなる。

その結果、色素は光酸化される（この帳尻を合わせるには、電子が必要で、鉄や硫化水素などから、それを取り出す）。

これは、葉緑素がすることに他ならない。

葉緑素は、われわれの血中で、酸素を運んでいる、色素ヘムと構造の似たポルフィリンの一種だ。ポルフィリンは、比較的複雑な部類に入る、分子でありながら、小惑星から単離されたり、原始スープと思しき条件の下で、実験室で合成されたりしている。

つまり、ポルフィリンは、初期の地球で、自然に出来た可能性が高いのである。

結局のところ、光化学系Ⅰは、色素としては、十分に単純なポルフィリンを用いて、光を原動力として、自発的に生じる、その化学的作用を、何であれ、細菌の細胞で起きる反応に、結びつけている。

その結果、生まれた原始的なタイプの光合成は、光を使って、鉄や硫化水素などの「扱いやすい」供給源から、電子を引き抜き、その電子を、二酸化炭素に渡して、糖を合成することが出来た。こうして、これらの細菌は、光を使って、食物を作り出している。

光化学系Ⅱについては、どうだろう？

この光化学系を利用する細菌は、光を使って、全く違う芸当をやっている。

このタイプの光合成では、有機物は出来ない。

その代わりに、光のエネルギーを化学エネルギーに、それどころか、電気にまで変えて、細胞の動力として、利用出来るようにする。

そのメカニズムは、とても単純だ。

光子が、葉緑素の分子に当たると、先ほど言った通り、1個の電子が、高いエネルギー準位へ持ち上げられ、近くの分子に捕らえられる。

それから、この電子は、次々と運び手を変えながら、電子伝達系を素早く渡って行き、その間に、少しずつエネルギーを放出し、終には、低いエネルギー準位へ戻る。

この過程で放出された、エネルギーの一部から、ATP が出来る。

最後に、こうして使い果たされた電子が、最初の葉緑素に戻り、回路が完成する。

要するに、光が、電子を高いエネルギー準位へ持ち上げ、その電子が「安静時の」準位へ、段階的に落ちる時に、放出されるエネルギーによって、細胞が使えるエネルギー形態である、ATP が出来るとの事だ。

これは、光を原動力とした、電気回路に他ならない。

そんな回路が、どうやって出来たのか？

答えは、やはり、混ざり合ううちに、結びついた、と言うものだ。

この電子伝達系は、既に、見た通り、熱水孔で進化を遂げ、呼吸に利用されたものと、大よそ変わらない。

ほんの少し新しい用途のために、転用されたに過ぎないのだ。

呼吸では、前に述べた通り、電子は、食物から引き抜かれて、最終的に酸素へ渡り、水が出来る。この際に放出される、エネルギーは、ATP を作り出すのに使われる。

今、話題にしている、光合成でも、同じようなことが起きる。

高エネルギーの電子が、伝達の連鎖に沿って、渡って行く訳だが、ただし、最終的に、酸素でなく、

「貪欲な」(酸化する)タイプの、葉緑素に渡る。

葉緑素が、電子を「引き抜く」力が強いほど(つまり、葉緑素の化学的性質が、酸素に近いほど)、電子伝達系は、より効率的に、電子からエネルギーを引き出すようになる。  
大きな利点は、少なくとも(新たな有機分子の合成に必要な)エネルギーの供給に、燃料すなわち食物が要らないこと、なのだ。

すると、一般的な結論として、細菌における、これら単純なタイプの光合成(光化学系Ⅰだけの場合と、Ⅱだけの場合)は、モザイク状の特徴を持つと言える。

どちらのタイプも、葉緑素という新たな変換装置を、既にある、分子のマシンに繋いだものだ。  
一つの場合では、このマシンは、二酸化炭素を糖に変え、  
もう一つの場合では、ATP を作りだす。

葉緑素については、きっと、初期の地球で、似たようなポルフィリン色素が、自発的に生まれたに違いなく、後は、自然選択の仕業なのだろう。

どちらの場合でも、葉緑素の構造における、小さな変化が、吸収する光の波長を変え、その結果、化学的性質も変わる。  
こうした変化には、当初は、非常に無駄が多いが、自発的に生じたプロセスを、効率的なものにする。

結果として、自然に、一部の、気ままに動ける細菌において、ATP を作り出している「貪欲な守銭奴」のタイプの葉緑素と、  
硫化水素や鉄の供給源の側に棲む、細菌において、糖を作り出している、「ストリートマジシャン」のタイプの葉緑素が生まれた。

しかし、それでも、未だ、大きな疑問が残る。  
これらが、どのようにして、シアノバクテリアの Z 機構で結びつき、究極の燃料である、水を分解するようになったのだろうか？

[83] 電子で一杯になっている、光化学系Ⅱから、電子が無くて、手が空いている、光化学系Ⅰに、電子を流す方法が生まれた。

端的に答えを言えば、確かなことは、分らない。  
だからと言って、答えを出せない訳ではない。  
科学における、仮説の大いなる価値は、知られざるものへ想像を、飛翔させることによって、仮定の証明や反証が出来る、新しい見方や実験を提示する所にある。

ここに、ロンドン大学で、生化学教授を務める、創意豊かな人物、ジョン・アレンによる、見事な

アイデアがある。

科学における、最高のアイデアは、皆そうだが、この仮説も、幾重にも、まとまった複雑さを、完全に切り裂くだけの、単純さを備えている。

科学の素晴らしいアイデアの、全てが、正しい訳ではないから、これも、正しくないかも知れない。しかし、たとえ、間違っているとしても、どのようにして、そうなった可能性があるかを、示しているのので、それを検証する、実験を提示することで、研究者を、正しい方向へ導く、洞察と刺激の両方が与えられるのだ。

多くの細菌は、環境の変化に応じて、遺伝子のスイッチのオン・オフを行っている、とアレンは語る。これ自体は、良く知られた事実だ。

環境のスイッチとして、トップクラスの重要性を持つものが、原材料の有無である。

一般に、細菌は、周囲に原材料が無いと、それを処理するタンパク質を、新たに作るようなエネルギーの無駄使いはしない。

次に通知があるまでは、作業を中止するのだ。

そこで、アレンは、変動する環境を考えた——例えば、硫化水素を吐き出す、熱水噴出孔が、近くにある、浅い海のストロマトライトである。

その環境は、潮汐や海流、季節、熱水の活動などに応じて、変わるだろう。

重要なのは、アレンの想定した細菌が、今日のシアノバクテリアと同じく、二つの光化学系を、両方持ちながら、シアノバクテリアと違って、一度に、一つしか、使わなかった筈という点である。

硫化水素がある場合、この細菌は、光化学系Ⅰのスイッチをオンにし、それで、二酸化炭素から有機物を生み出す。

こうして出来た、物質を取り込んで、細菌は成長したり、増殖したり出来る。

ところが、環境が変化して、原材料のない状態で、ストロマトライトが残された場合、この細菌は、光化学系Ⅱに切り替える。

すると、細菌は、新たに有機物を作るのは止めるが（もう成長も、増殖もしない）、太陽光で、直接ATPを作ることによって、ましな時になるまで、生き延びる。

どちらの光化学系にも、それなりのメリットがあり、どちらも、既に述べたような、単純なステップを踏んで、進化を遂げたのである。

だが、熱水噴出孔が、活動を止めたり、海流の変化で、環境が、長期的に変わったりしたら、どうなるだろう？

すると、細菌は、大方の時間を、光化学系Ⅱの電子の回路に頼って、生きなければならない。

しかし、ここで、有り得べき、問題が浮上する。

回路は——周囲に、電子が乏しいために、ゆっくりではあっても——いずれ、環境から入る電子で、詰まってしまう恐れがあるのだ。

電子の運び手（電子運搬体）は、電子を持っているか、持っていないか、のどちらかであるが、やがて、全ての電子運搬体が、電子を持っている状態になる。

これでは、どの電子運搬体も、電子を回せなくなり、プロセスは、目茶苦茶になって、終わる。

問題は、本質的に、太陽光にある。

特に、未だ、オゾン層がなく、多くの紫外線が、海水面まで到達していた頃の、太陽光だ。

紫外線は、水を分解するだけでなく、マンガンや鉄を筆頭に、海水中に溶けた金属や鉱物から、電子を弾き出しもする。

そして、これが、まさに、プロセスを、邪魔するような問題を生み出した、に違いない。

電子が、少しずつ、回路に入るのだ。

鉄もマンガンも、今日の海水に、高濃度で見つかりはしない。

海が、すっかり、酸化されているからだ。

しかし、太古の時代には、どちらも豊富に存在した。

実際、マンガンは、奇妙な円錐形の「団塊」（ノジュール）として、海洋底に、大量に見つかっている。

つまり、海は、かつて、マンガンを満ち溢れていたのである。

細菌にとって、マンガンは、必需品だ。

マンガンは、抗酸化剤として働き、破壊的な威力を持つ、紫外線から細胞を守ってくれる。

マンガン原子は、紫外線の光子を吸収すると、電子を放出して、光酸化され、その際に、紫外線を「無力化」する。

だから、細菌は、両手を広げて、マンガンを迎え入れる。

問題は、こうしたマンガン原子が、電子を放出する時、光化学系Ⅱが持つ「貪欲な守銭奴」のタイプの葉緑素に、電子が、飲み込まれてしまい易いということである。

そのため、回路は、やがて、電子で一杯になってしまう。

余分な電子を、逃がす手立てが、何か無ければ、光化学系Ⅱは、ずっと、非効率のままになる。

では、細菌は、どうしたら、光化学系から、電子を逃がすことが、出来るのだろうか？

ここが、アレンの仮説の、全く凄い所だ。

光化学系Ⅱは、電子で一杯になっていても、光化学系Ⅰは、電子が無くて、手が空いている。

そこで細菌は、二つの光化学系を、同時に働けないようにしているスイッチを、生理機能によって、あるいは、一つの変異によって、壊して終いさえ、すれば良い。

すると、どうなるか？

電子は、先ず、酸化されたマンガン原子から、光化学系Ⅱに入る。

それから、「貪欲な守銭奴」のタイプの、葉緑素が光を吸収すると、この電子が、高いエネルギー準位へ打ち上げられる。

そこから、電子は、電子伝達鎖を渡って行き、その間に、放出するエネルギーで、多少の ATP が出来る。

その後に、乗り換えが、起きる。

電子は、それを、次々と取り込んで、動きの鈍くなった、光化学系Ⅱへは戻らず、未だ、新しい電子に飢えている、光化学系Ⅰに回収されるのだ。

ここで、「ストリートマジシャン」のタイプの、葉緑素が、光を吸収すると、電子は、再び、高いエネルギー準位へ打ち上げられる。

そして、もちろん、この後、電子は、終に、二酸化炭素に渡り、新たな有機物が生まれる。

たった一つの変異で、二つの光化学系が直結し、電子は、マンガン原子から、Z 機構を一通り経て、二酸化炭素に渡り、糖を作る。

こんな、複雑極まりない様に見える、プロセスが、僅か一つの変異によって、いきなり、必然の現象になってしまうのだ。

この理屈は、申し分なく、分子の部品は、全て、その場に用意されており、どれも、個々のユニットとして、用を成す。

環境から受ける、圧力も、合理的で、予測がつく。

一つの変異が、世界を、これ以上、大きく変えたことは、かつて、一度たりとも有りはしない！

この全体像を、はっきり理解するには、簡単に、まとめてみるのが良い。

初めに、一つの光化学系があって、きっと、太陽光を使って、硫化水素から電子を引き抜き、二酸化炭素に、それを、押し込んで糖を作り出したのだろう。

やがて、ある時点で、遺伝子が複製され、それが、シアノバクテリアの祖先で起きた、のかも知れない。

複製によって出来た、二つの光化学系は、異なる用途の下で、分化して行った。

光化学系Ⅰは、それまでと同じ仕事をし続けたが、光化学系Ⅱは、電子の回路によって、太陽光から APT を生み出す仕事に、特化するようになったのだ。

二つの光化学系は、環境に応じて、スイッチが、オンになったり、オフになったりしたが、同時に、スイッチがオンになることはなかった。

ところが、やがて、光化学系Ⅱに、電子の回路に起因する問題が生じる。

環境から、余分に入ってくる電子で、回路が詰まってしまうのだ。

細菌が、紫外線から自分を守るために利用する、マンガン原子から、少しずつ、電子が、供給されていたに違いない。

この問題の、一つの解決策が、スイッチを駄目にして、二つの光化学系が、同時に、働けるようにすることだった。

それなら、電子は、マンガンから、両方の光化学系を通り、入り組んだ、Z 機構を、あらゆる画期的な点で、先取りしていた、複雑な経路をたどって、二酸化炭素へ、流れることになる。

これでも、完全な酸素発生型光合成まで、後一步届いていない。  
まだ、水からでなく、マンガンから、電子を引き抜いている。  
では、最後の变化は、どのように起きたのか？  
その意外な答えは、ほぼ、何も変わる必要がなかった、というものなのだ。

[84] 酸素発生複合体は、水から、電子を、一つずつ割って出す、クルミ割り器である。  
この複合体—— マンガンクラスター ——は、マンガン原子4個と、カルシウム原子1個のクラスター（集合）で、酸素原子の格子によって、一つにまとまっている。

電子が取り出されると、貴重な廃棄物である、酸素が世界に放たれる。  
酸素発生複合体は、確かに、光化学系Ⅱの一要素ではあるが、一番端にあって、外界に面しており、ただ「くっ付いている」ように見える。  
それに、恐ろしく小さい。  
この複合体は、マンガン原子4個と、カルシウム原子1個のクラスター（集合）で、酸素原子の格子によって、一つにまとまっている。  
それだけのもの、なのだ。

マイク・ラッセルは、数年程にわたり、この複合体の構造が、ホランダイトや、トンネル構造を持つ、カルシウムマンガナイトなど、熱水噴出孔で、こしらえられた、一部の鉱物に、驚く程、似ていると主張していた。

だが、2006年まで、マンガンなどの、クラスターの構造は、原子レベルの分解能では、解っておらず、ラッセルの声に、耳を傾ける者はいなかった。

しかし、今では、解っている。  
そして、ラッセルは、完全には、正しくなかったが、大まかな考えは、全くもって正しかった。  
ヴィットル・ヤチャンドラの率いるチームが、明らかにした構造は、ラッセルが、提示した、鉱物の形態と、酷似しているのである。

当初の酸素発生複合体が、光化学系Ⅱに刺さった、鉱物のかけらに過ぎなかったのか、どうかは、分らない。  
ひょっとしたら、マンガン原子が、格子状の酸素に結びついて、紫外線によって、酸化され、その場で、小さな結晶を成長させたのかもしれない。

あるいは、このクラスターが、葉緑素や、タンパク質のかけらの、側に、あったために、何らかの形で、少し変化を遂げ、機能を最適化したのかも知れない。

しかし、クラスターの起源がどうであれ、そこには、大いに、偶然の要素が有りそうだ。  
それは、生物の産物にしては、鉱物の構造に、余りにも近い。

酵素の中心に見つかる、幾つかの金属クラスターと同じく、数十億年前の熱水噴出孔の条件にまで、ほぼ間違いなく、遡れる。

どんな宝石より、希少な金属クラスターが、タンパク質に包まれ、シアノバクテリアによって、永久に保持されたのである。

どのように出来たにせよ、このマンガン原子を、主体とする、小さなクラスターは、初めに、それを捕らえた細菌だけでなく、地球上の全生命にとって、新たな世界を切り開いた。

この小さな原子団は、出来た途端に、水を分解し出し、4つの酸化された、マンガン原子が、生来の貪欲さで、水から電子を引き抜き、酸素を、廃棄物として放出した。

紫外線による、マンガンの着実な酸化が起こす、水の分解は、当初は、ゆっくりしたものだったろう。しかし、このクラスターが、葉緑素と結び付くと、電子の流れが生じた筈だ。

葉緑素が、その仕事に馴染んで行くにつれ、どんどん速く、水が、取り込まれて分解され、その電子が、引き抜かれ、酸素が放出されるようになった。

水から引き抜かれた、電子による、生命を活動させる、この流れは、初めは、滴り程度だったが、遂には、奔流となり、今や、地球上の生命の繁栄をもたらしている。

われわれは、二つの点で、これに感謝しなければならない。

われわれの、全ての食物を生み出す、究極の源であると同時に、その食物を燃やして生きるのに必要な、酸素を、全て、生み出してくれたのだから。

これは、また、世界のエネルギー危機を解決する、鍵も握っている。

そのために、光化学系が、二つある必要はない。

有機物の合成は、われわれには、どうでも良いからだ。

水から放出される、二つの産物——酸素と水素——さえあれば良い。

この二つを、また反応させれば、今後、必要な全エネルギーを生み出せ、廃棄物として、出るのは、水だけだ。

要するに、この小さな、マンガンクラスターで、太陽エネルギーを使って、水を分解し、更に、その産物を、また、反応させて、水を再生させることが出来る——言わば、水素エコノミーである。最早、環境汚染はなく、化石燃料は要らず、炭素は関与せず、人為的な地球温暖化は、起きない。ただし、まだ爆発の危険は、幾らかあるが。

この小さな原子団が、遠い昔に、世界の仕組みを変えたとしたら、その構造が解れば、今日のわれわれの世界を変える、第一歩にもなるに違いない。

世界中の化学者が、この小さなマンガンクラスターか、同じ位うまく働くものを、実験室で合成しようと、凌ぎを削っている。

近い将来、きっと、成功を収めるだろう。

そして、われわれが、水と、少しの日光で、暮らせるようになるのも、遠い未来ではあるまい。

以 上