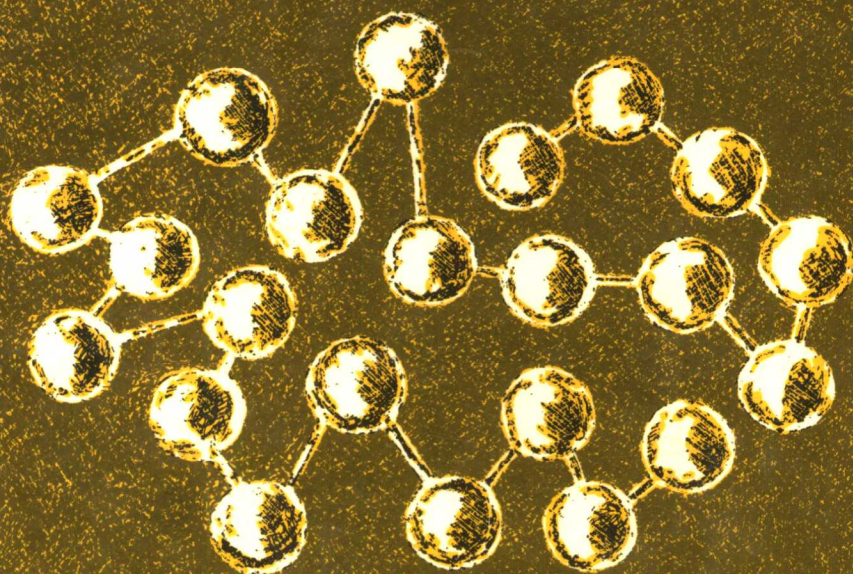


バーロー

生命科学のための物理化学

GORDON M. BARROW 著・野田春彦 訳

第2版



東京化学同人

G. M. BARROW 著・野田春彦 訳

生命科学のための **物理化学**

第 2 版

東京化学同人

の た はる ひこ
野 田 春 彦

1922年 東京に生まれる
1943年 東京大学理学部化学科卒
現 電気通信大学 教授
専攻 生物物理化学
理学博士

第1版 第1刷 1975年 8月25日 発行
第8刷 1982年 3月11日 発行
第2版 第1刷 1983年 4月1日 発行

生命科学のための物理化学
(第2版)

© 1983

訳 者 野 田 春 彦

発 行 者 植 木 厚

発 行 株式会社 東京化学同人

東京都文京区千石3丁目36番7号
電話 946-5311(代)・振替東京3-84301

印 刷 中央印刷株式会社
製 本 株式会社松岳社

Printed in Japan

序

生命科学を志す学生に対して物理化学の講義をすることは、学部の化学の教育として一般に行なわれるようになっている。ここでもし普通の物理化学の講義をすると——少々生物学的な例を入れるというだけでは——大切な機会を逃すことになる。そのような間に合わせの講義は学生の生命科学への関心を利用して、物理化学のための物理化学を学ばせるにすぎない。

別の行き方、それをこの本で試みるのだが、では生命科学に興味のある学生の望みを満足させながら、同時にその興味のあることを使って勉強させるようにする。学生が将来携わる生物学的分野で物理化学を楽しんで使えるようにしたいのである。もちろん学生たちの将来の問題や職業のことを個々に知ることはできない。しかし“生命科学”と一括して考えられる分野での理解と進歩を進める物理化学の主な道筋はわかる。これらのことを頭において、材料の説明の方法を考え、主な話題の選択と配列を行った。

第1版に比較すると二つ大きく変わっている。

第一に生物学との関連をもっと明らかにした。たとえば、例題を多くし、章末の問題も増やして、生物学的な問題に物理化学の応用ができることをわかるようにした。

第二は熱力学をずっと前にもってくる配列にしたことである。私自身が近年講義して、多くの教師がこの配列の利点をすでに知っていることを改めて痛感させられた。つまり熱力学で生物学的に複雑なものを取扱えるので、早くから熱力学を導入すると、学生が興味をもっている問題を物理化学でうまく解くという印象を与えることができる。

生命科学のための物理化学という講義を聞く学生は共通の興味をもってはいるが、生物科学でも物理科学でも基礎学力の程度はまちまちである。普通の物理化学の講義を聞く学生より数学の準備の足りないことが多い。それで数学的な段階的展開というより物理学的内容の理解によって補うように努力

した。しかしこの分野では数学の用語を使わなければならないこともある。その場合は平易な解説をした。数学的用語を使ったところでは章末の“数学のしおり”というもので補うことにした。その章の中の数学的記号の解説とまとめが書いてある。

最初の入門の章では化学を復習して、分子の世界と巨視の世界をつなぐものであることを思い出してもらう。つぎの3章では熱力学をよくわかるように、しかし数学を使わないで進めている。熱力学の本質、概念の具体的な基礎、生物学的におもしろい系への応用、ということに重点を置いている。これを基礎として、つぎの3章では平衡に関することを学ぶ。

つぎに溶液中の高分子の性質に関連する種々の輸送現象を材料にして時間の関係する現象を導入する。第1版では別々に扱ったことを一つの章でまとめて扱っている。

酵素反応速度論は化学反応速度論の特殊な一部だが、やはり一部であることがわかるようにしてある。反応速度論の2章のうち、第1の章では化学反応の速度と速度式、酵素の触媒する反応などが扱われている。第2章では反応の機構と分子の行動の詳細を考える。

生命科学の学生は自分の関心のある領域にとって量子力学は遠く応用のないものと考えることが多い。そうならないように、非常に現実的な分光学と量子力学とを結合させるようにした。この一石二鳥の章のつぎにはX線回折の章がある。ここで生物学の分野での小さい分子や高分子の構造の研究の結果に触れる。

第1版と異なって、量子力学、分光学、回折理論などから分子構造を考えることは後の方になる。ただこの材料は前の章の熱力学や速度論に依存はしない。それで第1版のように構造が先という考え方でこの教科書を使うこともできる。

この改訂をするのに多くの人の詳しい建設的な意見を頂いた。California 大学 Davis 分校の Claude F. Meares, North Carolina 大学の J. C. Morrow, Saint Louis 大学の C. J. G. Raw, Georgia 州立大学の Harry P. Hopkins, Jr., Agnes Scott 大学の Alice J. Cunningham, Georgetown 大学の DeLan-

son R. Crist, Missouri 大学 Kansas City 分校の Kenneth S. Schmitz, South Florida 大学の Jeff C. Davis, Kalamazoo 大学の Ralph M. Deal, Brigham Young 大学の S. Scott Zimmerman に特に感謝したい。

Gordon M. Barrow

訳者序

第1版では単位に混乱があって訳者が勝手に統一を試みたが、第2版では全面的に MKS 単位系に改められており、補助単位も SI 単位を使ってある。原書では説明のためにヤード、ポンドを注記してあるところもあるがこれは省略した。

問題の解答を含めて誤りを正したところもある。まだ誤りがあるかも知れず、訳が誤っているところもあるかも知れない。ご叱正を頂ければ幸いである。

昭和 58 年 2 月

野田 春彦

目 次

1. 物質と分子の性質	1
1・1 化学の世界の二面	1
1・2 光の粒子性	3
1・3 巨視-分子の関係: 生物学的な 2 例	4
1・4 理想気体の PVT のふるまい	5
1・5 混合気体の性質	9
1・6 $PV=nRT$ の式の分子論的基礎	11
1・7 気体分子の並進運動のエネルギーと速度	14
1・8 気体の非理想的ふるまい: van der Waals の式	16
1・9 分子の運動: 運動の自由度	21
1・10 液体分子のエネルギーと速度	23
1・11 量子力学的制限の考え方	25
1・12 許されるエネルギー値と Boltzmann 分布	28
問 題	30
2. 化学反応でのエネルギー変化	33
2・1 系と環境	33
2・2 エネルギーの保存: 熱力学第一法則	36
2・3 エネルギー量の便利な目安: 内部エネルギーとエンタルピー	39
2・4 熱化学式と反応熱	41
2・5 標準生成熱	43
2・6 水溶液の溶質の標準生成熱	46
2・7 電解質の標準生成熱	47
2・8 エンタルピーの温度変化: 熱容量 C_p	49
2・9 反応熱の温度変化	51
2・10 結合のエネルギー	53
2・11 分子の相互作用	54
2・12 数学のしおり	58
問 題	63
参 考 書	65

3. エントロピーと化学変化の進む方向	66
3.1 熱力学の第二法則：一般論	66
3.2 可逆過程と非可逆過程	67
3.3 エントロピーと熱力学第二法則の有効な表現	69
3.4 相の変化と温度の変化に伴うエントロピー変化	75
3.5 膨張と混合に対するエントロピー変化	77
3.6 エントロピーの分子的基礎	79
3.7 エントロピーと熱力学の第三法則	82
3.8 化学反応の進む方向を指示するものとしてのエントロピー	84
3.9 数学のしおり	86
問 題	89
参 考 書	91
4. 自由エネルギー	92
4.1 便利な関数：自由エネルギー	92
4.2 純物質に対する標準自由エネルギー	94
4.3 自由エネルギーの圧力と温度による変化	95
4.4 自由エネルギーの圧力による変化	96
4.5 溶液中の溶媒の自由エネルギー	97
4.6 理想的な非電解質溶質の自由エネルギー	99
4.7 水溶液中のイオンの自由エネルギー	101
4.8 活量と活量係数：非電解質溶質	102
4.9 活量と活量係数：電解質溶質	106
4.10 偏モル量	109
4.11 数学のしおり	110
問 題	112
参 考 書	113
5. 化学平衡と化学的駆動力	114
5.1 自由エネルギーと平衡定数の書き方	114
5.2 自由エネルギーと反応進行の程度	118
5.3 自由エネルギーの温度変化と反応の平衡定数	121
5.4 電極と電気化学的電池	125
5.5 EMF と自由エネルギー	128
5.6 Nernst の式	130
5.7 標準電位と活量係数の決定	131
5.8 標準電極電位	133

5.9 生きている系	137
問題	139
参考書	141
6. 化学的および生物学的系での平衡	142
6.1 水素イオン転移反応と酸の強さ	142
6.2 滴定曲線とプロトン化の程度	144
6.3 滴定曲線からの K_a とプロトン化の程度の計算	151
6.4 緩衝液と緩衝作用	154
6.5 リン酸基転移の反応	157
6.6 連続反応の平衡	159
6.7 共役化学反応	163
6.8 個々の結合部位での協同的結合と独立な結合	166
6.9 逐次結合の一般的取扱い	170
6.10 等価で互いに独立な結合部位	172
6.11 等価で互いに干渉する結合部位	173
6.12 数学のしおり	175
問題	175
参考書	177
7. 物理的平衡と膜現象	178
7.1 液体の蒸気圧	178
7.2 溶液に関する物理的平衡への入門	181
7.3 束一的性質	183
7.4 浸透圧測定から求める分子量	185
7.5 数平均分子量と重量平均分子量	187
7.6 透析平衡	189
7.7 Donnan 膜平衡	191
7.8 個々のイオンの輸送と膜電位	193
7.9 能動輸送	194
問題	195
参考書	196
8. 輸送過程の速さ	197
8.1 拡散	197
8.2 拡散係数の実測	201
8.3 拡散と酔歩の問題	204

8・4	拡散の分子的解释	208
8・5	超遠心機と沈降速度法	213
8・6	沈降平衡法	216
8・7	電気泳動	218
8・8	溶液中の高分子の形：粘度の測定	222
8・9	数学のしおり	230
	問 題	231
	参 考 書	233
9.	化学反応の速度	235
9・1	化学反応の速度の測定	235
9・2	速度式入門	236
9・3	実験値を一次反応の速度式に合わせる	238
9・4	速度の測定値を二次反応の速度式に合わせる	242
9・5	複雑な速度式：酵素で触媒される反応	244
9・6	酵素作用の阻害	248
9・7	一連の化学反応	250
9・8	緩 和 法	253
9・9	化学反応速度の温度による変化	257
9・10	光化学反応	260
	問 題	262
	参 考 書	265
10.	反 応 機 構	267
10・1	溶液中の素反応	267
10・2	反応機構と速度式：定常状態法	270
10・3	酵素で触媒される反応の機構	273
10・4	阻害された酵素反応の機構	275
10・5	素反応の理論	278
	問 題	283
	参 考 書	284
11.	分光学と量子力学	285
A.	分光学入門	285
11・1	分光学の使い方	285
11・2	Beerの法則	287
B.	量子力学入門	290

11・3	Schrödinger の式	290
11・4	三次元の量子力学系	291
11・5	水素原子の波動関数	295
11・6	化学結合論入門	297
C.	可視光および紫外線分光学	300
11・7	可視部および紫外部の放射線の吸収	300
11・8	蛍光	306
11・9	蛍光の消光	309
D.	赤外線およびマイクロ波分光学	312
11・10	赤外領域の振動スペクトル	312
11・11	分子振動と赤外スペクトル	316
11・12	マイクロ波領域の回転スペクトル	319
E.	核磁気共鳴分光学	322
11・13	核磁気共鳴	322
11・14	NMR 分光学による反応速度の測定	328
F.	旋光性と関連する性質	334
11・15	旋光性, 円二色性, 旋光分散	334
	問 題	340
	参 考 書	342
12.	結晶中の分子: 分子構造	344
12・1	結晶の分類と内部構造	344
12・2	X線回折の基礎と繊維構造の決定	347
12・3	X線回折法による結晶構造解析の基礎	351
12・4	単位格子の大きさ: プリセッション法	355
12・5	単位格子の中の分子	358
12・6	回折の強さと単位格子内の構造	360
12・7	Fourier 合成から求める構造	364
12・8	構造解析の結果とタンパク質構造の一面	368
	問 題	373
	参 考 書	375
付 録 I	無機化合物の熱力学的性質	377
付 録 II	有機化合物の熱力学的性質	380
付 録 III	解 答	384
索 引		391

1

物質と分子の性質

以下の章で学ぶことを概観し、さらに分子の考え方を広げることを試みる。最初に分子の世界の大きさを詳しく考える。つぎに気体の性質に注目して、分子のエネルギーを考察する。分子の世界での各粒子の大きさ、数、エネルギーが以後の学習の多くの面での基礎になる。

1・1 化学の世界の二面

この章のどこでも化学の世界に二面あることを忘れられない。第一は巨視の世界で、これは“普通の”寸法のものである。第二は分子的世界で、すなわち原子の世界でもある。現実の世界をこのように二面から見て、どのくらい差があるかを考えてみる。

化学を学ぶとき、普通の巨視的世界での物質の量は、通例モルという単位で測られる。モル (mol) は考えている物質の粒子の Avogadro 数 6×10^{23} 個にあたることを思い出してほしい。ある化学式で表現される物質の 1 mol の質量は、式の中の各原子の質量を原子質量単位 (amu) で表わして加え、その和をグラム単位にしたものである。

ある分子世界の物質を 1 mol だけ集めてみると、それは通常の、つまり巨視的世界の量になる。

化学式では H_2O である原子組成の水の分子は比較的小さい分子である。1 mol の水分子は 18 g の重量がある。1 mol の水の容積は 18 cm^3 で、大きじ 1 杯程度である (コップ 1 杯の水は約 13 mol である)。

比較的大きい分子であるヘモグロビン (タンパク質としては中程度の大きさでしかない) の 1 mol は約 65000 g の質量がある。普通の成人の血液中の全赤血球には約 0.01 mol のヘモグロビンがはいっている。

分子の世界の粒子を 1 mol 集めると、少量のことも大量のこともあるが、その量は日

常の大きさの範囲にはいる。

通常の世界と分子の世界の大きさの差は、1 mol 中の粒子数、Avogadro 数、の大きさで示される。たとえば、世界には 40 億、すなわち 4×10^9 に近い人が住む。もし何か奇蹟が起こって各人が現在の世界の人口にまで急に増えたとする。それでもその人数は 1 mol 中の分子の数より少ない。 6×10^{23} は想像もつかない大きな数で、世界の人口のように通常の世界で大きい数と考えるものと比較にならない。

分子の世界と巨視的世界の距離は、ほとんどの分子がどれほど小さいかによってもわかる。スクロース (ショ糖) $C_{12}H_{22}O_{11}$ を中程度の分子の代表と考える——水のように小さい分子とヘモグロビンのように大きい分子の中間。1 mol のスクロースの質量は 342 g、結晶の密度は 1.59 g ml^{-1} である。だから 1 mol の容積は $(342 \text{ g}) / (1.59 \text{ g ml}^{-1}) = 215 \text{ ml}$ 。つぎのように換算して

$$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ml} = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{スクロース 1 mol の容積} = (215 \text{ ml}) \frac{10^{-6} \text{ m}^3}{1 \text{ ml}} = 2.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

分子間の空隙を無視すると、分子の大きさの見当がつけられる。

$$\begin{aligned} \text{スクロース分子の大きさ} &\approx \frac{2.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 個の分子 mol}^{-1}} \\ &= 0.36 \times 10^{-27} \text{ m}^3 \text{ (分子あたり)} \end{aligned}$$

この容積を立方体とすると、一辺の寸法が求められる。

$$\begin{aligned} \text{スクロース分子の寸法} &\approx \sqrt[3]{0.36 \times 10^{-27}} \\ &= 0.7 \times 10^{-9} \text{ m} = 0.7 \text{ nm} \end{aligned}$$

分子の寸法の標準的なものとして 1 ナノメートル (nm) を覚えておくがよい。 H_2O のように小さい分子は直径 0.1 nm ほど、ヘモグロビンのように大きい分子は直径 5 nm ほどである。

メートルとそれに関係する単位、ミリメートル ($\text{mm} = 10^{-3} \text{ m}$)、マイクロメートル ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$)、ナノメートル ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$) などは SI 単位系で長さの単位として認められている。過去には原子や分子の寸法はオングストローム単位で表わされた。変換の係数は

$$\begin{aligned} 1 \text{ オングストローム } (\text{\AA}) &= 10^{-10} \text{ m} \\ 10 \text{ \AA} &= 1 \text{ nm} \end{aligned}$$

典型的な 0.1, 1, 5 nm の小, 中, 大の分子は 1, 10, 50 \AA という大きさになる。この本ではオングストロームの代わりに nm を使う。

以上のことはたいの化学入門教科書に書いてある。巨視と分子の区別をはっきり

することは以下の学習には重要である。しかし諸君が興味をもって学ぼうとしている分野では、この区別がはげやかけている。巨視から分子に至る物差しの上で細胞や細胞器官はどこに相当するだろうか。

第一に、だいたいの場合には細胞の内容は分子の集合と考えることができる。赤血球はヘモグロビン分子のはいった袋と考えてもよい。巨視的な世界では細胞は小さいながら部分品であると考え（ここで用語が少し混乱する。赤血球は顕微鏡でなくては見えない。だからこれは顕微鏡の粒子である。しかし分子の大きさよりずっと大きい）。赤血球は、直径 $7\mu\text{m}$ つまり 7000 nm のやや平たい円盤状の、中程度の大きさの細胞である。赤血球1個には約3億のヘモグロビン分子がはいっている。赤血球という粒子と、内部の分子、ヘモグロビン分子との“距離”はそれほど大きくない。

巨視の世界と分子の世界は、細胞の構成員のところで融合する。タンパク質の合成の場であるリボソームはその例である。リボソームについては両面からの性質がわかっている*。“リボソームは直径約 200 \AA (20 nm) の特異的で複雑な構造である。よく調べられているのは大腸菌のリボソームで、分子量は約250万……”。リボソームは粒子だけでも、モルあたりの質量を語れるほど分子の世界に近い。

1.2 光の粒子性

光も物質のように通常の世界のものである。しかし分子の世界のものとしての性質もある。光を扱う二つの方式の一つでは、電気的磁気的な波で波長 λ または振動数 ν というものの流れを考える。電磁振動は光の速度 c で空間を伝わる。振動数、すなわち空間の1点を毎秒に通過する波の数、は1秒間に1点を通る光線中の波の数に等しい。この光線の長さが c である。この考え方からつぎの関係が導ける。

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

c は光速で $3 \times 10^8\text{ m s}^{-1}$ である。

可視光のうち黄色に見える光は約 600 nm の波長である。振動数は

$$\nu = \frac{3 \times 10^8\text{ m s}^{-1}}{600 \times 10^{-9}\text{ m}} = 5 \times 10^{14}\text{ s}^{-1}$$

別の扱い方では光線を光子とか光量子とかいうエネルギーの塊の流れとみることができる。振動数 ν と光子のエネルギー ϵ の間には有名な Planck の式が成立する。

$$\epsilon = h\nu \quad (2)$$

比例定数 h は Planck の定数で

* Lubert Stryer, "Biochemistry", W. H. Freeman and Co., San Francisco (1975).

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (3)$$

Jはエネルギーの単位ジュールである。

たとえば黄色の光子のエネルギーは

$$\begin{aligned} \epsilon &= h\nu \\ &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J s})(5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}) \\ &= 3.3 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

これは分子の世界にふさわしい小さいエネルギーである [たとえば4.184 Jである1カロリー (cal) は熱の“通常”の量であり, 1gの水の温度を1°Cだけ上げる]。

地表に毎分太陽から到達する光子の数の平均を考えても光子の分子的性質を知ることができる。太陽のエネルギーの平均値として覚えやすい数は $1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ である。これから毎秒毎平方メートルに到達する太陽エネルギーの量をSI単位で計算できる。黄色の光を代表と考えると

$$\begin{aligned} \text{光子の数} &= \frac{(1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}) \frac{4.184 \text{ J}}{1 \text{ cal}} \left(\frac{10^2 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{3.3 \times 10^{-19} \text{ J(光子あたり)}} \\ &\approx 2 \times 10^{21} (\text{光子}) \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \end{aligned}$$

明らかに、光子は分子の世界の粒子である。1 m²にはほとんど1 mol近い光子が毎分太陽から飛んでくる。

1・3 巨視-分子の関係：生物学的な2例

前の2節で分子数、分子の大きさ、光子の数、光子のエネルギーなどを概算して復習した。この方法をはっきりするために2例をちゃんと計算してみる。この計算をしてみると生物学的現象の分子的な面の時間的目盛りの見当がつくという余徳がある。

例題1・1 平均的な活動をしているヒトのミトコンドリアに毎秒何個の酸素分子が到着するか、実測値はつぎのようにになっている。体重1 kgあたり毎分40 mlのO₂が消費される。成人は10¹²個の細胞からなり、細胞あたり800個のミトコンドリアがあるといわれる。

解答 体重を64 kgとする。毎秒の酸素消費量は

$$(40 \text{ ml min}^{-1} \text{ kg}^{-1}) \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} (64 \text{ kg}) = 43 \text{ ml s}^{-1}$$

1 molの気体の容積は22.4 l, または22400 mlとすると、こことつぎの節の計算が簡単になる。

$$\begin{aligned} \text{毎秒の酸素消費} &= \frac{43 \text{ ml s}^{-1}}{22400 \text{ ml mol}^{-1}} (6.02 \times 10^{23} (\text{分子}) \text{ mol}^{-1}) \\ &\approx 10^{21} (\text{分子}) \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

この消費酸素分子数をミトコンドリアの総数と比較しなければならない。

$$\begin{aligned} \text{ミトコンドリア数} &\approx (10^{12}(\text{細胞}))(800 \text{ ミトコンドリア}(\text{細胞}))^{-1} \\ &\approx 10^{15} \end{aligned}$$

そこで平均としてはそれぞれのミトコンドリアは約 $10^{21}/10^{15}=10^6$ 個の酸素分子を毎秒使う。ここでも分子の世界での 10^6 、つまり百万個の酸素分子と、ミトコンドリアの粒子の世界とはそれほどかけ離れていない。この間隙は、呼吸の反応はミトコンドリアの内膜の呼吸粒子群（呼吸体）で起こることを考えるとさらに小さくなる。このまだよくわからない粒子は百万くらいあるかも知れない。そうだとすると粒子あたり1分子の酸素ということになる。以下で1sは分子の世界では長い時間だということを学ぶ。だから分子のレベルでの転換をするための複雑な呼吸と代謝の過程には十分な時間をかけているわけである。

例題 1・2 日光にさらされた細胞の葉緑体には毎秒何個の光子が到達するか。典型的な葉緑体の直径は $4 \mu\text{m}$ である。

解答 前節で太陽光の放射エネルギーに対応する光子流は約 2×10^{21} 個 (光子) $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であることを知った。面積 $= \pi r^2$ の式から葉緑体の断面積は

$$\begin{aligned} \text{面積} &= \pi (2 \times 10^{-6} \text{ m})^2 \\ &\approx 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

標準的な葉緑体にあたる平均の光子数は

$$(2 \times 10^{21}(\text{光子})\text{m}^{-2} \text{s}^{-1})(1 \times 10^{-11} \text{ m}^2) = 2 \times 10^{10}(\text{光子})\text{s}^{-1}$$

例題 1・1 の酸素とミトコンドリアの問題に関しては、細胞器官に複雑な内部構造があることを考えなければならなかった。葉緑体の内膜はチラコイドというつぶれた袋の形になっている。分子レベルで光を捉える装置が、この膜の平面に分布している。これらはコンタソームと呼ばれるが、その直径は約 17.5 nm で、光子を集める有効面積は 240 nm^2 となる。この単位にあたる光子の数は

$$(2 \times 10^{21})(240 \times 10^{-27} \text{ m}^2) = 5 \times 10^{-6}(\text{光子})\text{s}^{-1}$$

で、30分間に光子1個となる。

以下で分子の世界の時間の刻みは短いことがわかる。1秒の百万分の1も続くことは分子の世界ではおそいと考えられる。だから光子を捉える装置はつぎの光子がくるまでに“長い”時間待たなければならない。

1・4 理想気体の PVT のふるまい

前の数節では巨視的な試料の中の分子の数とか、粒子の質量と大きさとかを考えた。さらに、光の基本的粒子としての光子のエネルギーについて述べた。つぎの3章での分子的考え方に対しては各個の分子の速度とエネルギーが必要になる。これは気体を考えてみるとよくわかる（この結果を少々修正すると、液体、複雑な液体、生きた細胞内の分子などにも適用できる）。