

光合成と地球環境

Photosynthesis and the Global Environment

渡 辺 正*

Tadashi WATANABE

植物の光合成と地球環境のかかりについて紹介した。光合成はマクロな側面で食糧とエネルギーの主要供給源になるほか、地球上の炭素循環の恒常性を維持する。ミクロに見ると超高速・高効率・超高集積度のエネルギー変換分子システムとして興味深い。次に、光合成の太陽エネルギー変換効率が理論上の最大値で8%、日本のような中緯度地域では約1%レベルとなる事実を光合成の内部メカニズムに基づいて解説し、フィールドデータ(米の年収量など)と一致することを示した。最後に、二酸化炭素問題や地球温暖化問題をめぐる世の議論・風潮についてやや批判的な私見を述べた。

1. はじめに

植物の光合成は地球環境と切っても切れない関係にある。そのあたりを紹介するとともに、環境問題がらみで日ごろ思うところを述べてみたい。

光合成については今や中高校の教科書にもかなり書いてある。ひとことでいうと、ありふれた単純な物質、二酸化炭素(CO₂)と水(H₂O)を原料に、太陽光エネルギーの助けをもらって炭水化物(高エネルギーの有機物)を合成する植物の営み。そのとき副産物として酸素(O₂)を出す。草や木がのろのろやっているつまらない仕事、と過小評価してはいけな。地球全体でみれば驚くほど大きな規模の物質・エネルギー変換プロセスだし、なにしろ光合成生物が生まれなければ私たち人間も生まれなかった。

とはいえ逆の過大評価もよくない。たとえば国のある機関が、産業由来のCO₂を「地球温暖化」の元凶と見なし、さらに「藻類の光合成能力はすごい」などという妙な思いこみに立って、藻類にCO₂を固定させる研究に巨費を投じ続けている。落ちついて考えると、そんな試みに成算はないとわかる。私たちが何か行動をとれば必ずCO₂はふえるし、藻類(サンゴも含む)だろうが道ばたの草だろうがCO₂固定能力に差はない。荒れ地に草でも植えたほうが気が利いている。

そのへんを判断するうえでカギになるのが、光合成のしくみから必然的に出てくる太陽エネルギー変換効率の

値。結論を先に言ってしまうと、日本のような中緯度地域なら光合成の太陽エネルギー変換効率はせいぜい1%しかなく、単位面積あたり単位時間に固定できる二酸化炭素の量もこの1%に相当する天井を打つ。植物の種類には関係ない。「1%」の根拠をお伝えするのも主眼のひとつにしよう。

2. 地球環境問題と人口・エネルギー・CO₂……

まず地球環境問題のあらましを眺めておく。温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、熱帯林の破壊、砂漠化の進行など、いろいろな(すべて舶来の)キーワードがマスコミにぎわしているのは先刻ご承知のとおり。その背景には、産業革命以降の人口爆発と、それに伴うエネルギー消費がある。人口爆発はもちろん食糧不足につながる。さらに、今後ますますやっかいになりそうなのが、政治がらみの南北問題か。

このうち、エネルギー源と食糧の問題が光合成と密接な関係をもつ。わずかな原子力を除き産業エネルギー源の大半を占める化石燃料は、いま現在進行中の光合成ではなく、数千万年とか数億年前に植物がやってくれた光合成活動の産物にほかならない。食糧はむろん「いま現在進行中の光合成」から来る。以上のようなことを略図にすると図1になる。

人口を眺めてみよう。最近300年間の世界人口の動向を図2に示す。図では外れていて見えないが、キリストが生まれた西暦0年は約2億人だったという。それが1700年たつて6億、1800年時点で9億、1900年でも16億

*東京大学生産技術研究所 第4部

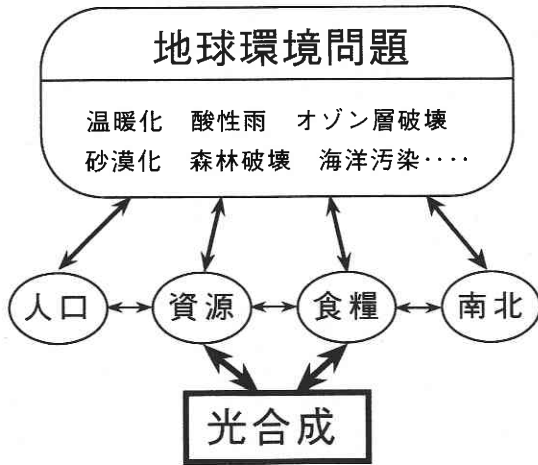


図1 地球環境問題と光合成との関連

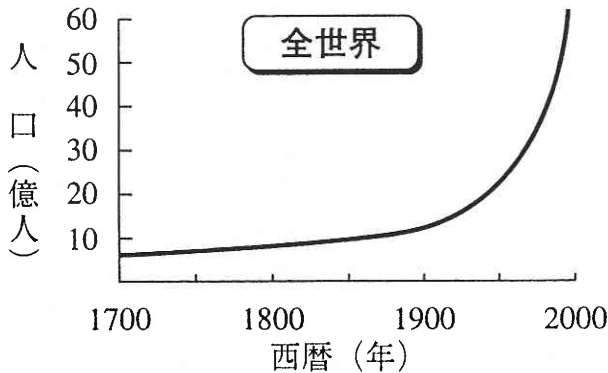


図2 過去300年間の世界人口の動向 (ボンティング著, 石弘之訳『緑の世界史・下』, p.29, 朝日新聞社, 1994)

と、徐々にしかふえてこなかったのに、ここへきて急増を続けている。人類の誕生がかりに100万年前なら、ヒトが10億(西暦1825年)まで数をふやすのに100万年もかかったわけ。しかしその後は急ピッチ。現在(約60億人)までを10億きざみの5段階でみると、10億ずつふえる期間が100年, 35年, 15年, 12年, 10年……と、目覚ましい勢いで短縮中だ。私たちは今「40年で倍増」の指数関数曲線上にいる。なんととってもこれが地球環境問題の原点だ。

食糧の生産力で決まる「地球の収容可能人数」はいくらだろう? いろいろ議論はあるにしろ、低い見積もりで80億人, 高くても100億人という声をよく聞く。80億人なら2030~2040年だろうし, 100億人でも2050年あたりと予想される。今の幼稚園児や小学生が世の中を動かす時代か。人類の行く手にはこうした恐ろしい状況が立ちはだかっている。

エネルギーの消費量は、いうまでもなく人口におおむね比例する。しかし資源は無限ではない。必ずなくなる。

横軸を西暦0年から3000年までに広げて描けば、化石燃料の使用量は図3のように予測されている。産業革命のころまで人類は石炭や石油に関心がなかった(エジプトでミイラの防腐剤にピッチをつかっただけ)。石油など、つかわれだして100年もたないなのに、ほとんどデルタ関数の趣で消え失せようとしている。1800年前後から本格的に掘られた石炭にしても、石油よりマシだとはいえ、いずれはピークを通過してなくなる。

石炭は3億年くらい前の石炭紀に植物がやってくれた光合成の遺産、石油は1億5千万年ほど前のジュラ紀を中心にしてはびこった動物(むろん光合成産物を食べて育った動物たち)のなれの果て。つまり今の産業化社会は、太古の光合成の遺産を食いつぶしながらろうじて維持され、この遺産が有限だという厳然たる事実が、もろもろの環境問題の根にある。

化石燃料は、つかえば必ず二酸化炭素になって大気に出る。地球を直径13cmのリンゴとみれば、対流圏(ジェット機高度の2倍)までの大気圏は厚み0.2mmの皮みたいなもの。だからわずかな物質が入りこむだけで組成が変わり、当然のことにCO₂濃度がどんどんふえている。そのようすを図4に示してある。

産業革命の始まる前、たぶん数千年間は280ppmの一

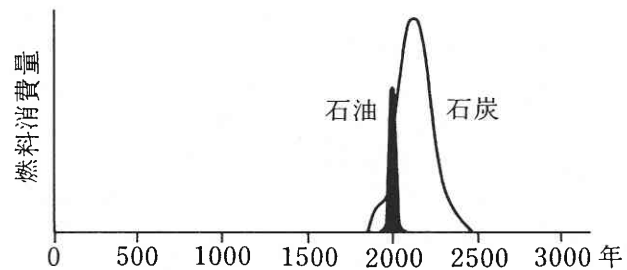


図3 石油と石炭の消費予測 (ペルーツ著, 中馬一郎訳『科学はいま』, p.62, 共立出版, 1991)

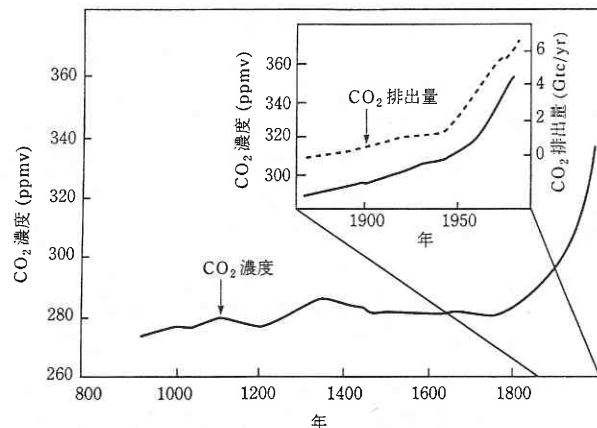


図4 過去1000年間の大気中CO₂濃度の動向 (秋元肇『高校化学の教え方』, p.225, 丸善, 1997)

定値だった大気中濃度が、排出量 (=化石燃料消費量) と並行してどんどんふえている。ちょっと古い本に載っている 0.03% という数字は 1972 年や 73 年、つまり四半世紀も前の値で、今はもう 370 ppm を超しているから四捨五入すると 400 ppm、つまり 0.04% と言わなければいけない。この CO₂ をなんとかしようという話については、終わりのほうで少し考える。

3. 地球環境と光合成

一部はすでに述べたが、環境問題にからむ光合成研究のマクロ面での意義は図 5 のように表せる。

いま進行中の光合成は、まず、モノをつくってくれる。一見したところ私たち人間もモノをつくっているように思えるけれど、少なくとも食物はいっさいつくっていない。植物の生産物を利用 (横取り) しているだけ。植物はついでに材料 (木材) も供給してくれる。

もうひとつがグローバルな炭素の循環。約 3700 億トンの CO₂ (炭素の重さに換算して 1000 億トン) が年間に固定される。大気中の CO₂ 総量は 2 兆 7500 億トンなので、年々その 7 分の 1 くらいを有機物に変える壮大な化学プロセスだといえる。もちろん固定するばかりではなく、ぴったり同じ 3700 億トンの CO₂ が腐敗と呼吸で大気に戻っている。こうした恒常性は産業革命以前の数千年間は維持されてきた。人間の活動がそれを狂わせ始めたというのが、いわゆる二酸化炭素問題になる。

かたや過去の光合成は、第一に、150 万種とも 1000 万種とも、あるいは数千万種ともいわれる生物すべてを産み出した。そんな生物がいま地球の環境をつくっている。そして第二に、前述のとおり、産業社会を動かすエネルギー源 (化石資源) をつくってくれた。というような面で、環境問題と大いにリンクしていることになる。

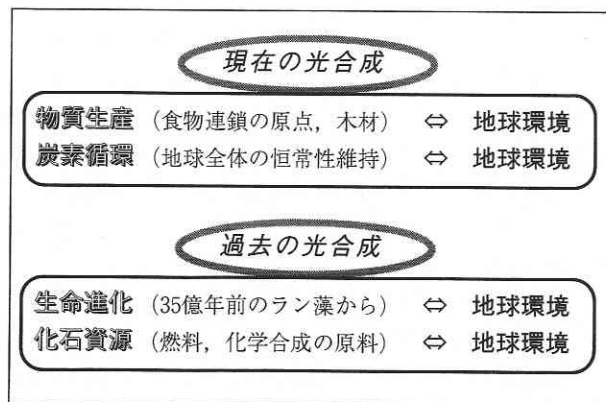


図 5 マクロにみた光合成と地球環境とのかかわり

4. 光合成のミクロな側面

マクロ面の意義に加え、光合成のミクロな、つまり原子・分子レベルでの研究の意義は、図 6 のようにまとめられる。

光合成は、高速・高効率・高集積度の光→電子→化学エネルギー変換システムだといえる。光合成器官の内部では多段階の電子移動が進み、いちばん速いところはほぼピコ秒で終わる。効率にはいろんな見かたがあるが、いわゆる量子効率でみると、数十段階の電子移動を経ながら 100%、つまり 1 個の光子が末端で確実に 1 個の電子を動かす。かたや集積度では、光合成反応を完全に駆動できる分子集合体の 1 単位 (光合成単位) なるものが考えられ、その単位が緑葉 1 mg あたり 1 兆個ほどつまっている勘定になる。超高集積回路もまっ青の集積度だといえよう。

そのへんまではわかっても、分子・原子レベルではまだブラックボックスに近いから、研究熱もきわめて高い。国際会議が 3 年ごとに開かれ、そのたびに 4000~5000 頁のプロシーディングが出る勢い。しくみがこまかくわかってくれば、だいたいのことだろうけれど人工的な太陽エネルギー変換デバイスの設計指針になる。そのあたりを謳い文句にして筆者の研究室では化学の側面から光合成メカニズムの一端をいじっている。本稿の主題ではないにしても、ざっと紹介しておきたい。

植物の細胞内には、サイズ数ミクロンの葉緑体 (クロロプラスト) という粒がある。中には袋状の構造が詰まっていて、袋の膜 (チラコイド膜。厚みわずか 100 Å 内外の究極の膜) に、さまざまな機能分子やタンパク質が、きちっと決まった三次元の構造体をつくって納まっている (図 7)。そういう分子たちの共同作業が二酸化炭素を有機物に変え、太陽の光エネルギーを化学エネルギーの形で固定する。

光合成をする生物はじつにさまざまで、そのうち下等なバクテリアについては、分子レベルのメカニズムもかなりよくわかってきた。しかしラン藻 (霞ヶ浦のアオコ

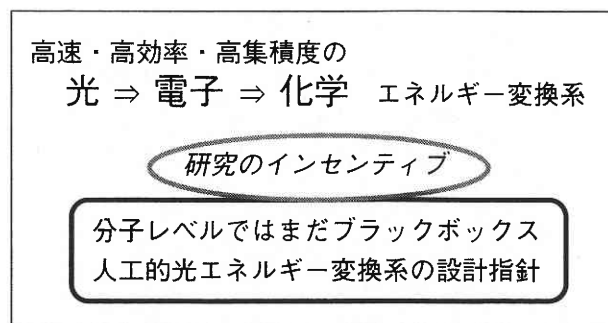


図 6 ミクロにみた光合成の特徴と研究の主眼点

もその一種)とか藻類, 高等植物はまだわからないことだらけ. 筆者の研究室では, 図8に示すクロロフィル(葉緑素)という分子の物性と生体内機能についておもに調べている. まだ教科書レベルには下りてきていない新種をひとつ見つけ, 図7に示した分子集合体中のきわめて重要な部位で機能しているらしいとの感触をつかんでいる(詳細は略).

ついでにもうひとつ. 昨年, 研究仲間のひとりがまた別のとんでもない新種を天然に見つけた. 図8の中央にいるマグネシウム(Mg)が亜鉛(Zn)に変わったクロロフィル(厳密にいうと, 分子内にあと一ヶ所だけ小さな差がある). クロロフィルの呼び名は1817年にフランスの学者がつけたもので, 以来180年間, 天然の色素はすべてマグネシウム化合物というのが定説だった. それをくつがえしたのをおもしろがって調べを続けているが, これについても詳細は別の機会に譲りたい.

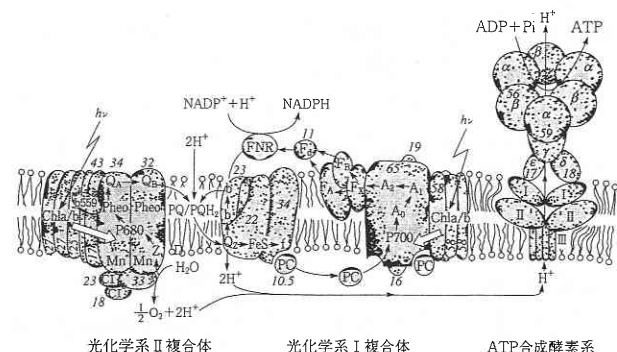


図7 葉緑体中のチラコイド膜で進むプロセス(渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.91, 朝倉書店, 1996)

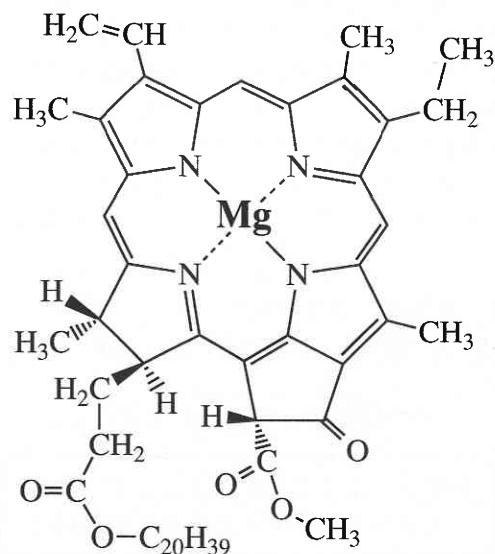


図8 地球上で最大量を占める金属錯体, クロロフィルaの分子構造

5. 光合成の仕事

植物の光合成が地球環境や人間活動とどのようなかわりを持ち, どのような効率で太陽光のエネルギーを変換するかについて, すでに述べたことの補足もしながら説明しよう.

5.1 地球上の森羅万象を支える

少なくとも生物のからむ森羅万象は, 植物の光合成活動のおかげで動く. 道ばたの雑草を眺めてもそんな感慨は湧かないだろうけれど, 地球上の生命を産み, あらゆる動物の食べ物を供給し, 私たち人間の活動を大枠でしっかりと支えるのが光合成. そのあたりを個別にもう一度みてみよう.

(1) 生命史の源

地球の誕生は45~46億年前だといわれる. 遅くとも35億年前には, ラン藻に似た生き物が海に棲んでいたらしい(96年11月の新聞記事によると, さらに3億年ほどさかのぼるといふ). ラン藻は単細胞の植物プランクトンで, 陸上植物と同じく, 酸素を発生するタイプの光合成をする. 出た酸素がじわじわと大気にたまり, 大気の上層で一部が紫外線を受けオゾンに変わった. 生命はしばらくは海中のまま, およそ25億年前に多細胞生物を生んで進化を続けた.

4億年ほど前, 紫外線を弱めるオゾン層ができてやっと陸上にも生物が棲めるようになり, たまたま上陸した緑藻の一種が進化・分化して今の植物相につながり, 同じころに上陸した魚が両生類・爬虫類を経て多様な動物相をつくったらしい. 私たち人類も5億年前は魚だった. つまり35億年前の光合成生物の出現が, 地球の生命史に一線を画したといえる(図9). 自然が光合成のしくみを発明しなければ, 38億年前に生まれた生命もそのうち養分(有機物)を消費し尽くして滅亡し, 地球上は無生物のままだっただろう.

(2) 食物連鎖の原点

食物の話でいうと, 動物の栄養になる有機物をつくっているのは植物だけ. 食卓の上を眺めて少し考えればわかる. 野菜や果物は光合成の直接産物で, ステーキもポークも植物を食べて大きくなった動物の肉. 海産物はどうかといえば, まず海藻の類は植物そのものだし, 魚とか貝は, 結局のところ植物(根元にいるのが植物プランクトン)を餌にして大きくなっている. 光合成に関係のないのは水と食塩くらいなものだ.

人類はこういう食物連鎖(図10)の頂点にいる. といえば聞こえはいいが, 実のところは植物におんぶしてやっと生きていける存在でしかない. 寄生虫みたいなものだ. そんな視座も, 長い目で地球環境を考える際には不可欠だろう.

旧約聖書をひもとけば、冒頭の「創世記」にこう書いてある。神はまず初日に光をお造りになった。3日目に植物を、5日目に動物を、そして6日目に人間を造り上げ、7日目にはひと休みされた（これが日曜日の起源か）。この順序は、光→植物→動物という生命進化のありようにもぴたりと合う。

(3)産業のエネルギー源

部屋の蛍光灯を考えてみよう。発電所から来た電気で明るく光っている。発電所では（火力発電なら）石油を燃やした熱で発電機を動かす。石油は1.5～3億年くらい前の動物組織の変性物で、動物は植物を食べて育ったわけだから、つまるところ蛍光灯の明かりは太古の太陽光が姿を変えたものにほかならない。

ジェット機を飛ばすのも新幹線を走らせるのも、巨大なビルの建築も工場の生産活動も、すべてが太古に降り

注いだ太陽エネルギーのおかげだ。見た目は華やかな現代文明も、私たち人類が自力で作り上げたものだとはいってはいえない。

図3を頭に置きながら高速道路の流れを眺めていると、数がふえすぎたら海につっこんで集団自殺するという動物（名前は忘れた）の話の思い出す。石油という禁断の実を食べた人類が地獄へ突っ走る姿か。

5.2 光合成の太陽エネルギー変換効率

(1)太陽エネルギーの大きさ

太陽エネルギーの規模は表1でわかる。太陽が核融合で生むエネルギーのうち、立体角の関係で22億分の1ほどが地球に届く。雲や地球表面が反射・散乱する分を差し引いた年間値 $3 \times 10^{24} \text{J}$ は、世界の年間エネルギー消費量の1万倍にあたり、50分間の太陽光で年間の所要量がまかなえる。

地球表面に達したエネルギーの約1000分の1（0.1%）が水圏と陸上の植物の光合成を通じて有機化合物の化学エネルギーに変わり、さらにその200分の1ほどが私たちの食糧になる。光合成で固定されるエネルギーだけでもまだ世界エネルギー消費量の10倍はあるから、いずれ化石資源が枯渇した暁、太陽エネルギーだけでやっていくのも理屈の上では不可能ではない。

(2)光→化学エネルギー変換のしくみ

さて、植物は太陽エネルギーのうちどれくらいの割合を固定できるか、それをあたろう。

光エネルギーの変換を考えるには、「光=エネルギーの粒」という視点が必要になる。詳細は省いて典型的な数字だけいうと、たとえば快晴の真昼、地面の 1cm^2 にはほぼ 10^{20} 個の光の粒（光子）が降ってくる勘定になる。1個の光子は、物質内の1個の電子にぶつかって消滅し、電子を高いエネルギー状態に打ち上げる。そうやって物質が受けとめたエネルギーを、私たちの利用しやすい姿に変えようというのが光エネルギー変換の基本。

水力発電を思い起こせばわかりやすい。太陽熱が海水

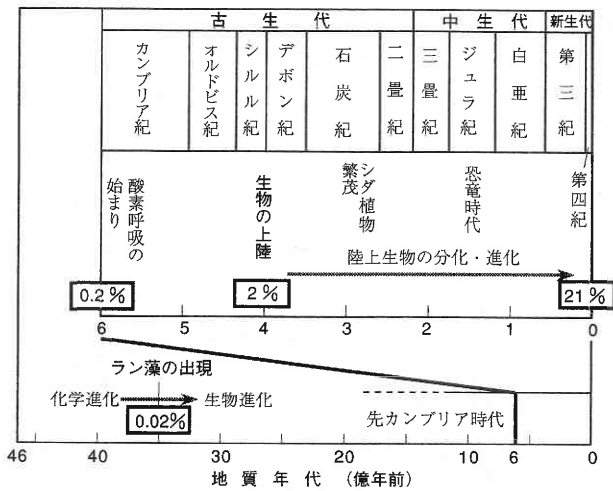


図9 生命の発生と進化。太い四角内の数字は大気中酸素濃度の推定値（渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.88, 朝倉書店, 1996）

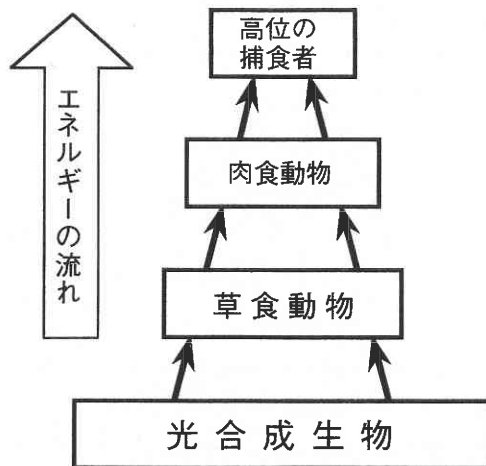


図10 自然界の食物連鎖

表1 太陽光エネルギーの大きさ（渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.83, 朝倉書店, 1996）

太陽のエネルギー	$1.2 \times 10^{34} \text{Jy}^{-1}$	
↓ (22億分の1)		
地球の受ける太陽エネルギー	$5.5 \times 10^{24} \text{Jy}^{-1}$	相対値
↓ (ほぼ半分が反射)		↓
地表十海洋面に達するエネルギー	$3.0 \times 10^{24} \text{Jy}^{-1}$	(10,300)
↓ (1000分の1)		
光合成で固定されるエネルギー	$3.0 \times 10^{21} \text{Jy}^{-1}$	(10.3)
↓ (200分の1)		
食糧となるエネルギー	$1.5 \times 10^{19} \text{Jy}^{-1}$	(0.05)

世界のエネルギー消費量	$2.9 \times 10^{20} \text{Jy}^{-1}$	(1.00)
(うち化石燃料分)	$2.8 \times 10^{20} \text{Jy}^{-1}$	(0.95)

や陸水の H₂O 分子の運動を活発化して水面から飛び出させ、飛び出して高空に上がった分子が雨や雪になって高い場所に落ちる。こうして水が得た位置エネルギーがタービンを回して発電する、というのが水力発電のストーリーで、光エネルギー変換もよく似ている。

図 11 に、太陽電池の原理を描いた。太陽電池は固体(半導体)の光吸収が発電の根元となるが、原理は光合成ほかすべての光エネルギー変換系に当てはまる。どんな物質も、一定値(図 11 では ϵ_g) より大きいエネルギー(ϵ_p) の光子だけを吸収できる(光子エネルギーは波長に反比例するので、一定値より短い波長の光を吸収できる、といってもよい)。ただし、 ϵ_g を越すエネルギーの光子を受けとってその分だけ高いエネルギーに電子が移っても、電子はほぼ一瞬のうちに最低エネルギー(ϵ_g) まで落ちるから、ロス(図の「損失分」)は必ずある。

(3)吸収波長域で決まる最大値

図 11 からたやすく想像できるとおり、 ϵ_g がうんと小さければ、やってきた光の大半を吸収できる反面、損失分だらけになるから変換効率はゼロに近い。いっぽう、 ϵ_g がきわめて大きいと、入射光をほとんど吸収できなくなってやはり変換効率はゼロになってしまう。したがって変換効率は、どこか適当な ϵ_g 値で最大値をとる。どんな ϵ_g 値が最適かは、光源(今の場合は太陽光)の発光スペクトル特性で決まる。

太陽光のスペクトル特性を図 12 に描いてある。紫外線が 3% 程度、私たちの目に見える可視光が 45% ほど、残り(52%) が赤外線、というのが内訳。

変換の原理(図 11) と光源のスペクトル(図 12) をもとにすれば、太陽エネルギー変換効率の最大値と ϵ_g 値との関係がたやすく計算できる。その結果を図 13 に描いた。 ϵ_g の単位につかっている電子ボルト(記号 eV) というのは、化学でおなじみの単位 kJ mol^{-1} と $1 \text{ eV} = 96.5 \text{ kJ mol}^{-1}$ の関係にある。また、可視光のエネルギーは 1.7 ~ 3.1 eV の範囲に入る。

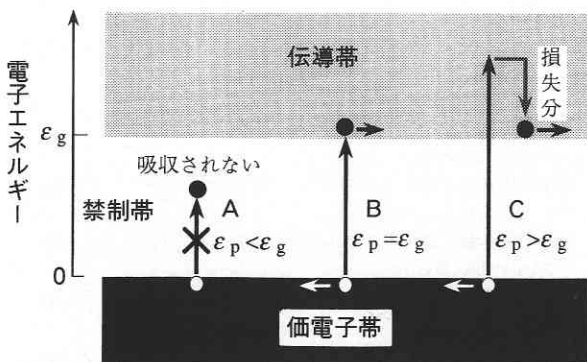


図 11 半導体の光吸収 (渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.85, 朝倉書店, 1996)

変換効率は $\epsilon_g = 1.1 \sim 1.3 \text{ eV}$ あたりで最大値(約 30%)をとる。これはちょうどシリコン結晶の ϵ_g 値に近く、太陽電池の市場でシリコンが 99.5% 以上を占めるのはそのためである(資源量の多さも要因のひとつ)。光合成はどうかというと、 ϵ_g 値はだいたい可視光の端にあたる 1.8 eV なので、図 13 から変換効率が 24% になる。ただしこれは、図 11 の獲得エネルギー(ϵ_g) がその後まったくロスなしに利用できる場合の話。

(4)内部メカニズムで決まる最大値

何かが変化するときには、必ずエネルギーが消費される。植物体の内部で起こる光反応や電子移動も例外ではない。そのへんの事情を図 14 に描いた。図中のさまざまな記号や数値は無視していただくとしてポイントだけ説明しよう。まず、吸収される光のエネルギーは、2本の太い上向き矢印で表され、電子ボルト(eV)単位でいうと $1.8 \times 2 = 3.6 \text{ eV}$ になる。これを駆動力にして、1個の電子が、左手の軸でいえば +0.8 V 付近から -0.4 V 付近まで持ち上げられ、その差 1.2 V (エネルギーで 1.2 eV) が生成物質にとりこまれる。この「内部事情」のために効率が $1.2 \div 3.6 = 1/3$ になってしまう。

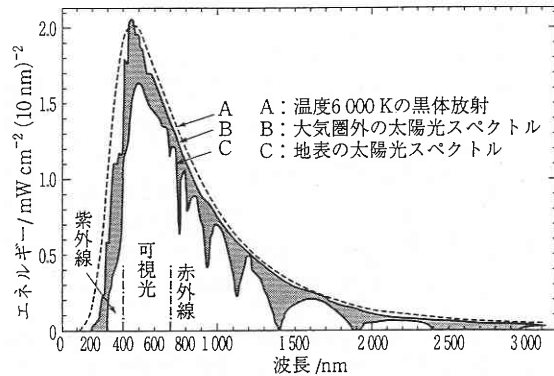


図 12 太陽光のスペクトル分布 (渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.84, 朝倉書店, 1996)

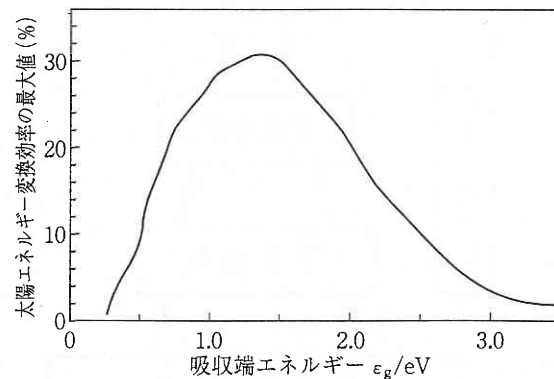


図 13 物質の吸収端エネルギーと太陽エネルギー変換効率の関係 (渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.85, 朝倉書店, 1996)

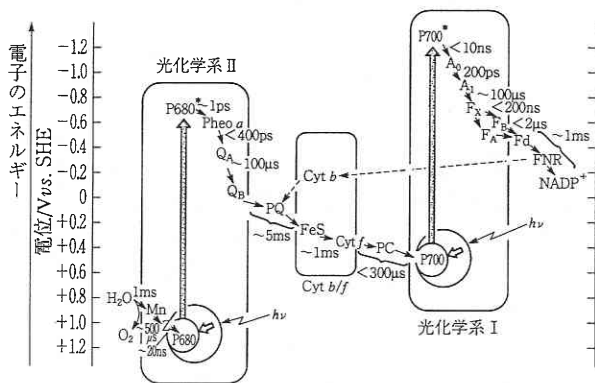


図 14 光合成初期過程のエネルギー図 (渡辺正・中林誠一郎『電子移動の化学』, p.92, 朝倉書店, 1996)

内部事情がなければ 24% だったから、その 3分の1で 8%。したがって光合成の太陽エネルギー変換効率は、どうあがいても 8% を超せない。

(5) 吸収の不完全さと代謝によるロス

この 8% もまだ理想にすぎない。今までは植物が可視光を完全に吸収すると仮定していた。完全に吸収すれば真っ黒に見えるはずのところ、植物は緑色をしている。緑の光を反射したり透過させたりするせいだから、それだけで変換効率はまず 6~7% レベルに落ちこむ。さらに、植物はひたすら人類のためにエネルギー変換をしてくれる機械ではなく、自分も生きるためにエネルギーを使う。呼吸や代謝、生長に消費するエネルギーである。そのへんはたぶん半分くらいは必要なので、太陽エネルギー変換効率が 3% あたりに落ちてしまう。

(6) 現実の値

変換効率は、下記(8)に注目すると実測でき、さまざまなデータが報告されている。熱帯地域だと最高値で 2~3% に達し、上の見積りにびたりと合う。日本のような中緯度地域でも、たとえば夏の 2ヶ月くらい、植物の生育にきわめて好都合な条件が揃っている期間の瞬間風速なら、変換効率は約 2% になる。しかし通年でみると、季節により生育条件が揺れるため、よく管理された作物でもせいぜい 1% どまり。この 1% が、縄文杉だろうとアサガオだろうと藻類だろうと、あらゆる植物種に当てはまる。光合成メカニズムと植物の生理で決まる上限値にはかならない。

陸地のうち植物の生えている部分だけの通年平均ではざっと 0.3% まで落ちる。また、不毛の砂漠や山岳地帯も含めた地球表面全体の通年平均だと、表 1 に記したように 0.1%、つまり 1000 分の 1 になってしまう。

8% から 0.1% までの道のりを表 2 にまとめた。

(7) 太陽電池と比べる

周知のとおりシリコン太陽電池の変換効率はアモルファスでも 10% に達している。かたや光合成はせいぜい

1% と、一桁は低い。けれども、だから光合成など問題にする価値はない、と思っはいけない。ほうっておいてもひとりで堅実に太陽エネルギー変換してくれるのが、人工の太陽電池にはない植物の真骨頂だ。

太陽電池はそれなりのエネルギー (つまりは石油) を消費してつくる。その消費以上のエネルギー (電力) を寿命内に産み出すかどうか、筆者は怪しいと感じている (だから「太陽電池は環境にやさしい」という宣伝文句も、今のところ素直には聞けない)。

開発を進めている方々は「投入エネルギーは 2 年以内にとり戻せる」とおっしゃるけれど、電力の一部を助けるパネルを屋根に敷けば 500 万円もかかる事実との激しい段差を筆者はまだ納得できていない。西暦 2000 年の目標とされている太陽光発電量が現行総発電量の 1/1000 に満たないという事実も「道なお遠し」を匂わせる。ただし、民生機器に小規模な形で利用することの価値は大いに認める。単一乾電池 4 個の電力が家庭電源なら 1 円分しかなくても、なにしろ便利だから私たちは乾電池を買う、それとまったく同じ意味で。

(8) フィールドデータと比べる

上で述べた光合成の太陽エネルギー変換効率は、植物の生育量 (生育速度) ときれいに関連がつく。それを眺めよう。まず基礎になるのが、太陽光エネルギーの密度、つまり、一定面積あたり一定時間に地面がどれほどのエネルギーを受けるかの数字である。代表的なデータを表 3 にあげてある。

快晴で太陽が中天にあるとき (わが国の本土ではありえないが)、地表の 1m² あたりほぼ 1kW と、たいへん覚えやすい数値になる (1W は 1J s⁻¹、つまり毎秒 1J)。日本での最高値は夏至の日に実現され、800W くらいか。しかし太陽はいつも中天にあるわけではなく、昼夜・晴雨・季節で大きく変動する。その変動をならした平均値だと、日本では 1m² あたり 145W という実測結果がある。熱帯ではむしろ高くなり、場所によっては日本の倍くらい。ヨーロッパ中部は、日本よりだいぶ北に位置するのでやや小さめになってしまう。

表 2 光合成の太陽エネルギー変換効率

吸収端波長と内部機構で決まる最大値	8%
反射と透過のロスを差し引いた最大値	6~7%
植物の生活エネルギーを考えた最大値	3~4%
熱帯で観測された最大値	2~3%
中緯度で観測された短期のピーク値	約 2%
中緯度で観測された通年の最大値	約 1%
陸上植物 (全球) の通年平均値	約 0.3%
地表面・海洋全体の通年平均値	約 0.1%

もうひとつ基礎になるのが、物質の変化量とエネルギーの関係。これは図15のようにになっている。すなわち、2880 kJ という値のエネルギーをつぎこむと、グルコース（ブドウ糖）が180 g だけできる。植物体はおおむねセルロースとみてよく、セルロースはグルコース分子の重合体だから、今の2つの数字をそのままつかつて生育量を見積ってよい。

日本の平均太陽エネルギー密度 145 W m^{-2} と、変換効率1%を仮定してはじけば、結果は表4のようにになる。すなわち、面積1 ha (100 m × 100 m) あたり年間29トンのバイオマス生産が見込まれる。なお、同じ日本でさまざまな変換効率を仮定したときのバイオマス生産量と、それを炭素Cの重さに換算した値、およびCO₂固定量に換算した値を表5にまとめた。

わが国の稲作が「変換効率1%」にほぼぴったり相当することを確かめておく。一期作の米づくりはほぼ4月から9月までの5ヶ月にわたるので、29トンに5/12をかければ12トン (haあたりの収量)。これはバイオマス全体、つまり根・葉・茎も含めた重さにあたる。可食部（いわゆるコメ）の重さは全体のおよそ半分だとわかっているから約6トンと予想される。表6の統計データを見れば、ほぼそうになっているのがわかる。なお表6でオセアニアの値が突出しているのは、日射が日本の2倍近くあり（表3参照）、しかも二期作や三期作ができるためだ。

表3 太陽エネルギーの密度（日本の平均値は、柴田和雄『光と植物』, p.23, 培風館, 1982より）

快晴で太陽が中天	$1 \text{ kW m}^{-2} = 1,000 \text{ W m}^{-2}$
日本：最高値	800 W m^{-2}
日本：昼夜・晴雨・季節平均	145 W m^{-2}
熱帯地方	250~300 W m^{-2}
ヨーロッパ中部	> 100 W m^{-2}

かりに日射が2倍で二期作なら、8.81を4で割った2.2トンだから、変換効率にしてみれば日本の3分の1くらいでしかない。

1 ha は、昔の単位で10反にあたる。すると表6の値は反あたり600 kg 強になる。1反という面積は、かつて「ひとり1年分のコメがとれる面積」と定義された。ひとり1年分は、別の単位で1石 (= 10斗 = 100升) にあたり、重さだと150 kg。つまり現在、江戸時代以前に比べてコメの収量は4倍に上がっている。またひとつ脱線すると、おなじみの1坪 (3.3 m²) は、今は300分の1反だが、太閤検地以前は360分の1反だった。もうおわかりのように1坪は「ひとり1日分のコメがとれる面積」であり、建築面積からきたものではない。

表4 変換効率1%でのバイオマス生産量の計算

平均太陽光エネルギー密度	
	$145 \text{ W m}^{-2} = 4.6 \times 10^{10} \text{ kJ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$
	その1% $4.6 \times 10^8 \text{ kJ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$
2880 kJ でバイオマス（グルコース）が180 g	
	$\rightarrow 180 \times 10^{-6} \times (4.6 \times 10^8 / 2880) = 29 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$
稲作（約5ヶ月で収穫）	$29 \times (5/12) = 12 \text{ t ha}^{-1}$

表5 太陽エネルギー変換効率とバイオマス生産量（年間1 ha あたりのトン数）の関係

バイオマス	太陽光エネルギー変換効率				
	0.1%	0.5%	1.0%	2.0%	3.0%
植物体の乾重量	2.9	14	29	57	86
炭素Cへの換算	1.1	5.5	11	23	34
CO ₂ への換算	4.2	21	42	84	126

表6 1992年の穀物生産高 (t ha⁻¹単位) の地域比較（『世界国勢図会 1994~1995』, p.227, 国勢社, 1993）

国・地域	米	小麦	大豆
日本	6.27	3.72	1.40
北アメリカ	6.41	2.45	2.52
ヨーロッパ	5.63	4.52	2.56
オセアニア	8.81	1.66	1.70
発展途上国	3.53	2.42	1.72
世界平均	3.61	2.55	2.08

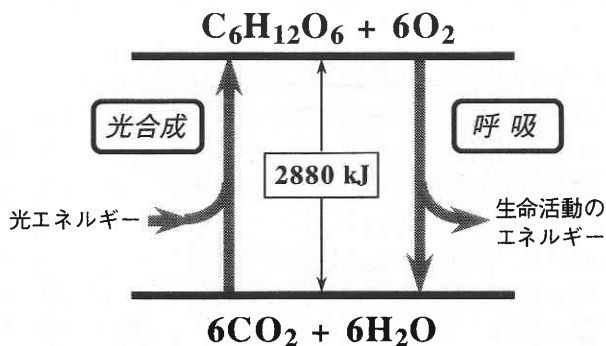


図15 エネルギーの出入りでみた光合成と呼吸の関係

(9)農業は健全か？

稲作がらみで蛇足をひとつ。コメづくりにはいろんな形でエネルギーをつぎこむ。エネルギーの根元はとりもなおさず石油である。一定の面積あたり、とれるコメの化学エネルギー ($17,000 \text{ kJ kg}^{-1}$) を投入エネルギー総量で割った値 (産出投入比) が1よりも大きければ、政治経済面はともかくとしてエネルギー面では健全だといえる。その点はどうだろうか。

あいにく手元には古いデータしかないが (新しいデータがその筋から出てこないため)、表7の数字が状況を雄弁に語る。健全だったのは昭和30年 (1955年) あたりまで。49年にもう4割を切っている。農家に生まれ「近代化・機械化」の動向を見てきた身としていま現在の状況を推測するに、産出投入比は0.2台、ひよっとすると0.1あたりまで落ちているのではないか。0.1なら、10の石油をつぎこんで1しかエネルギーを回収できていない。そういうことになる。いかにも自然の恵みで行われているように見える稲作も、今や結局のところ2~3億年前の遺産を食いつぶしながらやっているわけだ。それでも稲作はまだいいほうで、温室栽培の作物ならエネルギーの産出投入比は0.01台だろう。

上記したことがらと表7の数字から、江戸時代に比べ

表7 稲作のエネルギー収支と太陽エネルギー変換効率。上から「産出量」までの単位は 10^8 J ha^{-1} (『総合エネルギー講座 1. エネルギー工学総論』, p.4, オーム社, 1979を改変)

項 目	昭 25	昭 35	昭 45	昭 49
労働力	47	36	25	18
畜 力	12	7	0	0
機 械	57	160	579	667
肥 料	100	254	411	411
農 薬	3	35	81	82
燃 料	3	17	75	78
電 力	12	17	30	23
資 材		25	26	87
建 物	76	76	105	122
灌 漑	65	119	100	114
種 子	8	6	7	7
その他		56	135	361
投入計	383	808	1,574	1,970
産出量	485	665	724	741
◇ (トン)	2.90	3.98	4.34	4.44
産出投入比	1.27	0.82	0.46	0.38
変換効率 (%)	0.27	0.37	0.40	0.41

た単位面積あたりの収量は、戦後すぐの昭和25年でおおよそ2倍、現在は4倍になっている。とはいえ、農業や肥料、農業技術が今後どれほど進んでも、今の値は光合成のしくみで決まる上限に近いから、これ以上の伸びはもう期待できない。

5.3 人為起源 CO_2 の固定

(1)提案あれこれ

最後に、恐ろしい勢いでふえ続ける CO_2 (図4) を固定しようという試みについて私見を述べたい。いかにも「環境コンシャス」でウケのいい話だけれど、その実はどうなのか。

CO_2 は圧力をかければ固体 (ドライアイス) になる。そうやって深海に沈めてしまえという話がある。しかしこれは、回収・濃縮・固化・輸送に必要なエネルギー、とりわけ薄く分散してしまった CO_2 を集めるのに要するエネルギーを考えれば、とても成算はないだろうと筆者は感じている。それに、いったん沈めても数百年か1000年かたてば必ず大気に出てくるはずなので、長い目でみれば真の対策とはいえない。

また、生石灰 (CaO) に吸収させて炭酸カルシウム (CaCO_3) にしたらという提案もある。けれども生石灰は、エネルギーをつぎこんで炭酸カルシウムから CO_2 を飛ばしたのだから、まあ笑話でしかない。

電気分解の話もある。適当な電極材料をつかい、 CO_2 を加圧溶解させた水溶液を電解すれば、一酸化炭素 (CO) やメタノール、エチレン、エタノールなどができる。しかし CO_2 は、炭素1個の化合物としてもっとも酸化された (地球上の環境ではいちばん安定な) 分子なので、電気エネルギーを投入して還元すれば、化学→電気エネルギー変換効率が30%台の発電所で何倍かの CO_2 が出てしまう。とにかく、人工的な手段で CO_2 をなんとかしようとしても、どんな手段をとろうが、かえって大気の CO_2 をふやす結果にしかない。

(2)光合成を用いる CO_2 固定

では天然の光合成はどうか。それにはまず、私たち人間の活動が出している CO_2 の量をきちんと認識する必要がある。わが国から出る CO_2 量を、さまざまな表しかたで表8にまとめた。

いま私たち日本人は、 CO_2 をひとり1日27kg出している勘定になる (呼吸分は1kg)。体重の半分くらいか。年間1haあたりだと32トンにのぼる。

それを植物に吸わせようとするればどうなるか。上で述べた光合成の変換効率1%というのは、コメのように管理が行き届いた作物にしか当てはまらないので、半分の0.5%を仮定しよう。すると簡単な計算で、国土の1.5倍が必要ということになる。

だが問題はそんなに単純ではない。いま植物の生えて

表8 わが国の人間活動から出る二酸化炭素 CO₂ の量

年間総量 (質量)	12 億t
年間総量 (純気体の体積)	670 km ³
年間総量 (純気体の厚み)	1.8 m
毎分の平均値	2300 t min ⁻¹
年間ひとり平均	1 t person ⁻¹ y ⁻¹
1日ひとり平均	27 kg person ⁻¹ y ⁻¹
年間1haあたり平均	32 t ha ⁻¹ y ⁻¹
年間1m ² あたり平均	3.2 kg m ⁻² y ⁻¹

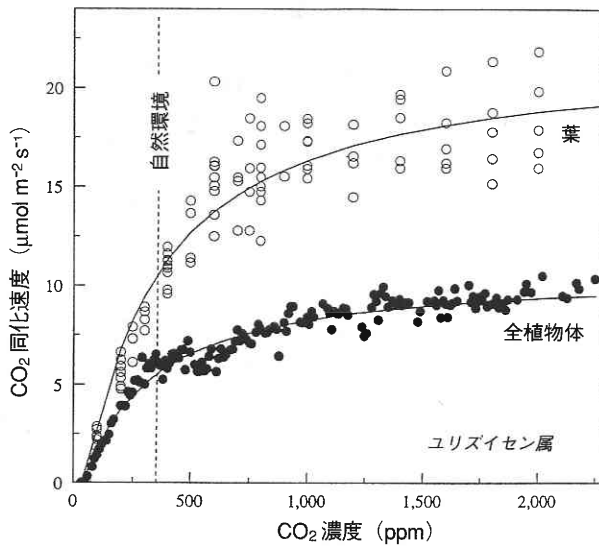


図16 CO₂ 濃度と光合成活性の関係 (M. Pessarakli, Ed., Handbook of Photosynthesis, p. 707, Marcel Dekker, 1997 を改変)

いる地面は、天然の循環をしっかりと担っているからつかいようがない。日本は森林 (65%) と耕地で8割を越し、残りのかなりは宅地だ。したがって、特別な目的につかえる地面は国土のせいぜい5%くらいだろう。150%必要なところ手持ちが5%なので、まったく見込みのない話になってしまう。

また、かりに固定してもどうするのか。食べ物にすればほぼ一瞬で CO₂ に戻る。植物体をほうっておいたら必ず腐って CO₂ になる。年々できる数億トンのバイオマスを積んでおく場所もないだろう。木材にして、燃やさずに利用するかどこかに埋めれば、数十年から1000年くらいは固定できたことになるが、それで処理できる CO₂ の量は放出量のほんのわずかでしかない。

(3) CO₂ の増加と光合成効率

CO₂ をうんと濃縮した環境で育てれば植物の生育も速い、煙突の出口でそんな植物を育てたら CO₂ 対策になる、

という声もある。たしかに植物はやや CO₂ 欠乏状態にあるが、CO₂ 濃度に比例して生長するわけではない。実例のひとつを図16に示す。天然濃度 (370 ppm) の倍になって2~3割がた生育が増すくらい。

ちなみに図16の縦軸目盛り10のところは、今までの単位に換算して140 t ha⁻¹ y⁻¹ に相当する。管理されて昼夜や晴雨のない生育実験ゆえ、照射光密度は日本の晴天にあたる 500 W m⁻² とすれば、表5の数値から、太陽エネルギー変換効率はやはり約1%になる。

(4) CO₂ の放出抑制?

また少し脱線して、気になっていることを書いておく。昨今、政府主導の「CO₂ 排出抑制対策」の話題がマスコミにぎわす。97年暮れには第3回気候変動枠組条約締結国会議 (略称 COP3) が京都で開催の予定だから、それに向けての騒ぎだろうけれど、筆者にはマンガとしかみえない。採掘してきた化石燃料は、どんな形でつかおうとも、いずれ必ず CO₂ になって大気に出る。排出抑制とか省エネは、こと CO₂ 放出に関するかぎり、図3の山を少し右手にずらすだけ、つまりツケを後世の子孫にまわすことでしかない。CO₂ が怖いならば (筆者は怖いとは思わないが)、有効な策はただひとつ、油井と炭鉱にフタをすることだ。

(5) 地球温暖化?

CO₂ の話は、たいてい「地球温暖化」にからんで出る。そのときいつも登場するのが、「過去100年の世界平均気温」というふれこみの図17。IPCC (気候変動に関する政府間パネル。ただし真の国際機関ではないようだ) がつくったというこの図には、どれほどの信頼性があるのだろうか?

地球の平均気温をはじき出すには、無数の観測点を張りめぐらさなければいけない。地球表面の7割は海である。100年も前から海上に無数の観測点を設けて気温が測られてきたはずはない。陸上にしても、人間活動のさかんな場所の気温はあまり参考にならないから (下記)、そうした場所以外の十分に多い観測点で温度を測ってきたのだろうか。周囲の方々にきいても今のところ要領を得ない。識者のご教示を乞う。

さらに言うと、1970年代はなんとなく気温が下がり気味だったから、「氷河期が来る!」と警告を発した学者も多いと聞く。それが80年代に入ってほんのわずかな上昇傾向が見られ、シミュレーション計算をしていた研究者の予測とも一致して、とたんに「温暖化」の大合唱になったとの話もある。いったん上げた叫びを引っこめるのは面子と研究費の都合でまずいから、そういう人たちが相変わらず叫び続けているだけ、というようながった見かたもあるらしい。残念ながら筆者にもほんとうのところはわからないのだが。

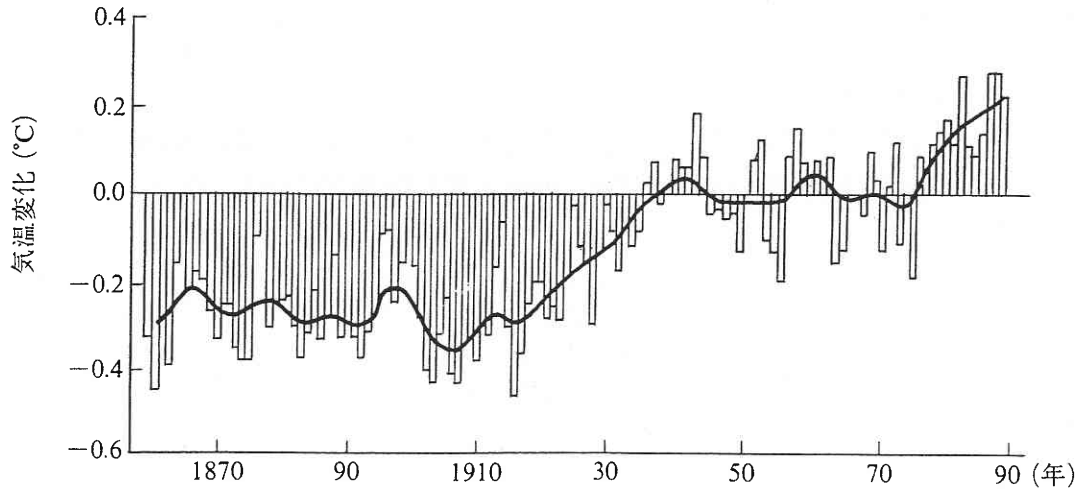


図 17 過去 100 年間の世界平均気温の動向 (鈴木英夫『地球環境を考える』, 渡辺正編, p.63, 丸善, 1994)

日本だけについていえば, 平均気温は確実に上がっている。東京湾の水温も 2~3 度は上がったという。しかしそれは, 「大気中の CO_2 」とまず関係はない。こんなせまい国土でこれだけ大量の化石燃料を燃やせば温まるのはあたりまえ。夏場の冷房など, 奪った熱の 10 倍くらいは熱を出すから, トータルでは住宅地をどんどん温めてしまう。

もうひとつよく見かけるのが図 18。南極のポストーク基地付近の水を深さ 2000 m あたりまで掘り, 深さ (年代) とともに CO_2 濃度と気温がどう変わってきたかを調べたデータだ。気温は, 水 (H_2O) をつくっている酸素原子 O の同位体 ^{16}O と ^{18}O の比から推定できる。二つのグラフに見られる並行関係を, CO_2 濃度の増減→気温変化という因果関係でとらえる人も多いけれど, 話はあべこべである。なぜか。

図の左端は現在を表す。 CO_2 濃度は 270 ppm 強で, これは産業革命前の値 (図 4 参照) にほかならない。今は 100 ppm も高い 370 ppm になっているが, 産業革命以降の 250 年間は, 図 18 の枠線の太さとほぼ同じなので, 図に描けていないだけ。さて図の結果は, CO_2 濃度変化 100 ppm と気温変化 10°C の対応関係を表す。もし CO_2 濃度の変動が気温変化の原因なら, 産業革命からこのかた世界の平均気温は 10°C ほど上がっているはずのところ, 現実には 0.4°C とか $0.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$ とかの話。

したがって図 18 の因果関係は, 気温変化→ CO_2 濃度変動, が正しい。気温変化の原因としていちばんありそうなのは, 地球の公転軌道の変動 (約 4 万年周期) ではないか。温かくなれば海水に溶けていた CO_2 が放出されて大気中濃度が上がり, 寒くなればその逆が起こる。図 18 の結果はそういう説明しかありえない。

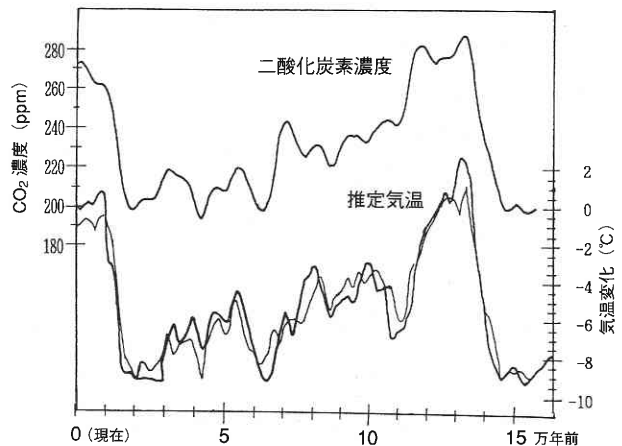


図 18 南極の水床コアの分析で得られた過去 16 万年間の CO_2 濃度と気温の変遷 (田中正之『温暖化する地球』, p.185, 読売新聞社, 1989 を改変)

6. おわりに

二酸化炭素 CO_2 がふえるのは (筆者のみるところ) たいた問題でもないけれど, 長い目で見れば, 図 3 のように化石燃料が必ずなくなってしまう状況は恐ろしい。今から 10 世代くらいは石炭でなんとかしのげるにせよ, 石炭もいずれは涸れてしまう。核融合がモノにならないかぎり, 人類の究極的な頼みの綱は「今の太陽」つまり光合成しかないだろう。

その日のために, たとえば遺伝子工学による高生産性・高抵抗性作物の創出などを含めた地道な研究を続けなければいけない。ただし自然は人間の道具ではないから, 植物を自在に改変できるなどと思えばヤケドするかもしれないが。

(1997 年 6 月 5 日講演)