

## 「持続可能性」の虚と実と

Imaginary and Real Parts of the Sustainability

渡 辺 正\*

Tadashi WATANABE

神を信じぬ者の仕業は砂漠の蜃気楼のごとし。  
水だ……やれうれしやと駆け寄っても  
そこにあるのは砂ばかり。——『コーラン』24章 39

## 1. はじめに

平坦な道だけでもなかったにせよ、誕生からほぼ100万  
年の間、人類はこの地球上で生をつないできた。これから  
も、いろんな知恵を出し合い、ときにはお互い譲り合えば  
人間社会は続いていく……と思いたいのだが、はたしてど  
うだろうか。

「持続可能性」を言うときはまず、「持続」のタイムス  
パンをどこにとるかが問題になる。50年100年なら「持続」  
とはいえない。未来永劫は無理にしても、せめて500年以  
上とか1000年2000年後にまできちんと目を配るのが、子  
孫への責任・礼儀というものだろう。

だが世には、せいぜい100年、ひどい場合は10年20年  
の先しか見ない「持続可能性」論が横行する。自分を含め  
ていま生きている人間だけが、資源を節約しながらつつが  
なく過ごせればよしとする「あとは野となれ山となれ」論  
だ。そのうえ——そうと知っての言動でもないのだろうけ  
れど——少し冷静に当たってみればとうてい成算はないと  
わかる技術課題がもてはやされ、貴重な人的・財政的資源  
がつぎこまれたりしている。

「先行き不透明」という言葉はいつの世にもあったが、  
今ほど切実に響く時代はたぶんなかった。100年後の世界  
さえ筆者には想像がつかない。選択肢は自明なのに（後半  
に書く）、そこを目指した行動はまだ始まっていないし、  
始まる気配も見えないからだ。

そのあたりを思いつくままに述べてみたい。まずは近ご  
ろいちばん仰天した出来事、ちょうど1年前に京都であつ  
た「温暖化防止会議」を筆者なりに評価しておく（本年の  
ブエノスアイレス会議も、予想どおりの姿で終わった）。

## 2. 科学を知らぬ者の仕業は…

大気に増える二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）が地球の平均気温を上  
げ、海面上昇とか異常気象とかを引き起こして地球にカタ  
ストロフィーをもたらす。だからわれわれはCO<sub>2</sub>の放出  
を減らさねばならぬ。それなら、対1990年比で2010年あ  
たりまでに、日本6%、米7%、EU8%（露0%）の排出  
削減を目指そうではないか……といったようなノリで名高い  
「京都議定書」がまとまり、以後、産業界（とりわけ電力  
業界）は四苦八苦されていると聞く。だがちょっと待っ  
ていただきたい。

まず「日本6%」とはいのが、1990年からこのかた産  
業活動はもう1割は伸びたので、現時点对応しようとし  
ても実質削減率は16%、つまり産業の6分の1を切れと  
いう話だ。そんなことができるのは誰も思うまい（合衆国  
も同様）。かたやロシアは1990年以降30%ほど産業活動  
が落ちこんでいて、どうがんばっても「0%」には届か  
ないから、余ったパーセンテージは先進国が大枚をはた  
いて買うはず。したがってCO<sub>2</sub>放出は絶対に減らない、と  
いうのが筆者の読みだ。

しかしそんな政治経済の話にも筆者はさほど関心がない。  
京都議定書の「あやしき」は、もっと根元のところ、  
サイエンスの不在にある。

CO<sub>2</sub>が増えると温暖化が進んで危いでしょう。温暖化に  
効くのは、ほかでもない、大気中CO<sub>2</sub>の総量である。か  
りに1割の放出削減ができたとしても、そのとき起こるの  
は、100年のはずだったCO<sub>2</sub>の蓄積時間が110年に延びる  
だけの話。言い換えると、その分だけ後のほうの子孫にツ  
ケを回すことでしかない。子孫をいじめてもいいのだ、と  
皆さん本気でお考えなのか。

化石燃料は、いったん掘ってくれば、遅かれ早かれ必ず  
炭素分と等モルのCO<sub>2</sub>になって大気に出る。したがって、  
子供でもわかるように、もしCO<sub>2</sub>が怖いなら、打つ手は  
ただひとつしかない。いま掘っている炭鉱や油井を、一部

\*東京大学生産技術研究所 第4部

なりと永久封印することだ。そういう声がついぞ聞こえてこないのはいったいなぜだろう？

いや、CO<sub>2</sub>の放出削減をすれば化石資源が節約できる、それはいいことなんだよ、という意見もある。この手の話をすると必ず出る反論だ。けれども化石資源は、石炭も考えればあと300年はもつ(後述)。1割削減の「成果」は、それを330年に延ばすだけだから、10世代あとの子孫に「この浮いた30年で、ポスト化石資源時代を生き延びる名案を出せ」と無理難題を押しつけるに等しい。

もちろん筆者は「化石資源はどんどんつかえ」などと言うつもりはない。快適に暮らしたいのは人間の本性で、途上国の人たちもそれを願っているのだし、いま頼りになるのは化石資源しかない以上、現実味のない数字をふり回してひとかどのことをしたつもりになっている方々に疑問を呈しているだけだ。せめて今後100年200年のうちに「脱・化石資源」体質をつくり上げるのが私たちの責務で、そこを真剣に論じようとしなければ、人類は滅んでもしかたないだろうと筆者は思っている。

話のついでにひとつ。わが国では、おもにマスメディアの「戦果」として、1億2千万国民のほとんどが「CO<sub>2</sub>増加→地球温暖化」物語を信じきっているのだが、じつはそれさえもあやしい。今いちばん信頼できるデータは、アメリカのNASAが1979年から続けている地球表面温度の衛星観測データで、それを見るかぎり、CO<sub>2</sub>が依然として急増しているここ20年間、地球の平均気温は(直線で近似すれば)むしろ下がり気味だ。くわしい内容については、ウェブに公開されている論文(<http://sitewave.net/project/review.htm>)をお読みいただきたい。

### 3. 「持続」の基盤

「持続」可能性を云々する前にまず、人間社会は何が支えているのかを正しく認識しよう。支えは大別して二つある。ひとつは「生物種ヒト」が生きるのにどうしても欠かせないもの(つまり食糧)、そしてもうひとつが、プラスチックの営み(産業活動・文化活動・政治行動など、生物としては蛇足の部分)に必要なもの。後者で頭に浮かぶのは、エネルギーと、多様な資源だろう。

ただし資源は、目の前にホイとこころがっているわけではない。それなりのエネルギーをつぎこんでやっと手に入る。そういう意味では、「資源」は「エネルギー」に内包される。

こうして、人間活動の支えは、食糧とエネルギーの二つだとわかる(じつは昨今、「食糧」もおおむね「エネルギー」に内包される。後述)。二つをいつも必要なだけ供給できれば「持続可能」社会となり、できなければどこかで必ず行きづまってしまう。そのへんを定量的に押さえない「持続可能性」論は砂上の楼閣、『コーラン』にいう「砂漠

の蟹気楼」でしかない。

### 4. 見えてきた瀬戸際

図1は安井教授の近著<sup>1)</sup>から拝借した世界人口のグラフで、過去2000年間の動向と、今後200年間の見通しが描いてある。産業革命が起こる前は見るべき急増などなかったのに、20世紀に入ってから100年間は、ほぼ「40年で倍増」の指数関数だった(ただし、世界人口が指数関数的にふえた時期は、この前に一度あった<sup>2)</sup>。人類が農耕を始め、定住生活に入ってしまったBC 6000～紀元0年の期間だけれど、行き着いた先が2億人だから、そのころ地球はまだ無限に広がった。

なんといても縦軸の値が怖い。1998年現在で60億の人口が、たぶん2020年代には80億人になり、2050年ごろには100億人に届こうとしている。

人口がふえれば、それにほぼ比例する形で食糧とエネルギーをつかう。「いい暮らし」を支えるエネルギーはともかくとして、食糧の生産量は、地球表面に降り注ぐ太陽光エネルギーの量で決まってしまう。その上限は、低い見積もりだと80億人分、高い見積もりでも100～120億人分ではないかといわれる(ちなみに、現代日本人の食生活を全員がするなら、地球上には約10億の人間しか許されないとの試算がある)。

それを思うと、冒頭に書いた「500年以上とか1000年2000年後にまで目を配る」という願いも空しく響く。つまり人類にとって今いちばんさし迫った課題は、ほぼ50年後を意識した食糧の確保だろう。このへんが農学部の仕事ではないか。

### 5. 食糧の源＝太陽光エネルギー？

少し考えてみれば、野菜・果物・肉類など私たちの口にする食物は、(水と食塩を除き)すべてが植物のやっている光合成の直接・間接産物だとわかる。光合成の太陽光エ

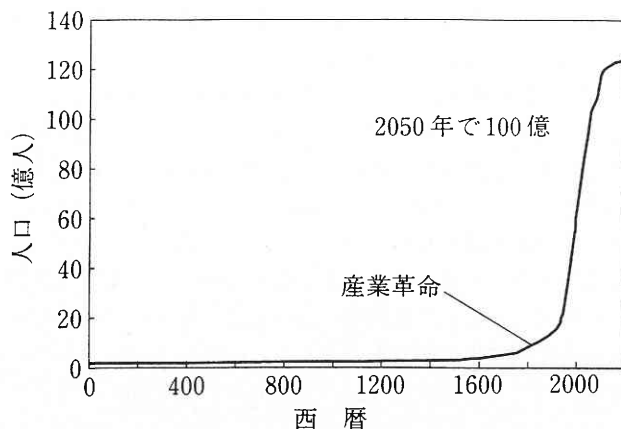


図1 世界人口、西暦0～2200年<sup>1)</sup>

エネルギー変換効率は、管理が行き届いて生育条件のいい作物でも通年値にすれば1%レベルで<sup>3)</sup>、地球の表面積と、降り注ぐ太陽光エネルギー(年間 $3 \times 10^{24}$ J、世界エネルギー消費量の約10000倍)は一定だから、生産量の上限はおのずと決まる。

今のところ、飢餓・栄養不良人口が8億を越すとはいえとにかく60億の人間が生きている。世界の穀物総生産量は年間およそ19億トンで、「コメならひとり年間1石=150kg」をもとにはじくと、穀物だけで120億人くらいは養える勘定になる。ほかに、いも類、砂糖、野菜、魚、肉があるし、肥料や農業技術の改善で収量はまだふえていく。

…というのが「ふつうの説明」だが、今の農業はそう単純な話でもない。そのへんを少し眺めよう。

まず、穀物生産19億トンといっても、そのかなりの部分を飼料にまわす。飼料につかってしまうと、エネルギー価値で鶏なら半分、豚で4分の1、牛で8分の1に落ちる。だから大人口をかかえる中国やインド、アフリカあたりが合衆国なみの食生活になれば、とたんに食糧は足りなくなるだろう<sup>1)</sup>。

もっと悲惨な現実もある。作物を収穫するには、肥料・機械・農薬・かんがい工事などが必要で、それにはことごとくエネルギー(つまりは化石資源)をつかう。そこで、たとえば1haからとれるコメの化学エネルギー(約 $10^7$ Jkg<sup>-1</sup>、収量は約6.5t ha<sup>-1</sup>)を、1haに投入するエネルギーの総量で割り算した値(いわゆる産出/投入比)が気になる。筆者の知るかぎり日本のもっとも新しい統計数値は1974(昭和49)年のもので、それ以後のデータはなぜか目につかないのだけれど、ともかく1974年(四半世紀前)の数字は、産出/投入比が0.38だった<sup>4)</sup>。

農村に生まれ育った身として、それ以後、農業がますます「近代化」してきた事実を目にしている。山陰の田んぼにも大型機械がどんどん入ってきた。たぶん今なら、産出/投入比は0.2内外、ひょっとすると0.1台かもしれない。つまり、100の化石エネルギーをつぎこんで10~20のエネルギーを回収しているだけ、というのが稲作の実情だから、今や農業といえども石油なしでは成り立たない。「食糧」が「エネルギー」に内包されると上で言ったのはそれを指す。温室栽培の野菜なら、カロリーベースで99%以上が石油起源になる。ちなみに、エネルギーの産出/投入比が1を越し、エネルギー収支の面でも健全だったのは今から45年ほど前、1955(昭和30)年までのことだった<sup>4)</sup>。

また、耕地の一定面積からとれる作物の量は、光合成の太陽光エネルギー変換効率で頭打ちになる。先進国の農業だと、収量はすでにほぼ理論上の限界に近いから、今後の伸びはほとんど期待できない。伸びを期待できるのは途上

国の農業だが、「近代化」が進むにつれてむしろトータルのエネルギー収支は悪化していく。

食糧を題材にして「持続可能性」を云々するとき、こういう数字、こうした現実をしっかりと押さえてかからなければいけない。

大気のCO<sub>2</sub>濃度が上昇すれば、光合成の効率は上がり、作物の収量はふえる。いろいろな実測データを見ると、現時点の濃度(370ppm)が倍増して700ppmになったら、少なくとも3割くらいは食糧生産が増加する。上で紹介したネット論文も、その事実を重視して、「CO<sub>2</sub>の増加は、産業革命が人類に贈ってくれたすばらしいプレゼントである」と結ばれている。

## 6. 産業エネルギーは大半が太陽から

化石資源を石油で代表させれば、私たちはいま「石油漬け」社会に生きている。工業活動はむしろのこと、上で論じたとおり、見た目は太陽エネルギーの恩恵を受けて進んでいるかにみえる農業も、少なくとも先進国ではもはや石油なしではありえない。

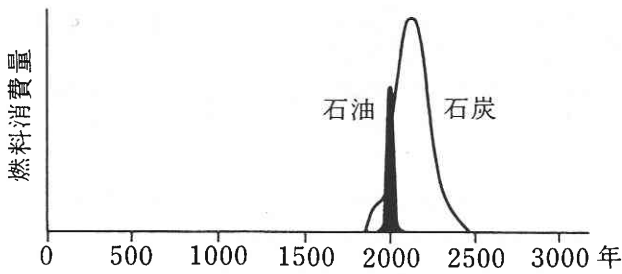
化石資源は、数千年~数億年前に繁茂した植物と、それを食べた動物の組織が高温・高圧で化学変化してできたもの、つまりは「太古の太陽光エネルギー」である。化石資源のうち、プラスチックや化成品などに回す分は数%レベルしかなく、ほぼ全部が燃料として燃やされる。

化石資源由来でないのは、発電の一部だけ。世界エネルギー消費のうち、電力はおよそ1割を占める。その3分の2に当たる火力発電は「昔の太陽エネルギー」のおかげだ。電力のほぼ20%を占める水力発電は「今の太陽エネルギー」によって行われる。発電量の17%、言い換えると世界エネルギー消費全体の1.7%を占める原子力発電だけは太陽に無関係だが、かりに世界のエネルギー需要のすべてを現行の軽水炉発電でまかなうとすれば、採掘可能なウラン資源はおそらく5~10年分しかない。

もっと込み入った事情もある。水力発電は、ダム建設や保守にそれなりの石油(昔の太陽)をつぎこむから、得られる電力がすべて「今の太陽」だというわけではない。また原子力発電は、鉱石の採掘・輸送・精製、燃料棒の加工、発電所の建設と保守、それに、数十年たって廃炉にするときの面倒な工事…などに必ず石油をつかうので、得られる電力の一部(かなりの部分?)は、やはり化石資源由来である。

こうしてみると、世界エネルギー消費のうち、ざっと98%くらいが根元は「昔の太陽」、1%くらいが「今の太陽」に由来していて、残るわずかな部分だけが純粋な核分裂の生むエネルギー、ということになる。

ほぼ98%を占める化石資源のうち、石油と石炭の運命については、図2のような予測がある<sup>5)</sup>。それまで誰ひと

図2 化石資源の消費, 西暦0~3000年<sup>5)</sup>

り見向きもしなかった石炭は産業革命のころから、また石油はほんの100年前からつかわれだして、ほぼ300~400年後にはなくなってしまう。最近の資料<sup>6)</sup>に、いわゆる可採年数は石油が44年、石炭が145年、天然ガスは63年とある。そうなら「300年」もやや甘い見通しだ。

図1と図2を並べて見れば、今後10年や20年はともかく、人類が今のような安穏とした暮らしを続けた場合、5世代10世代あとの「持続」が可能だとはどうい思えなくなる。

### 7. ポスト化石資源時代へ

化石資源はいずれ必ず底をつく。そうなった暁には、上でみたように、産業活動はおろか農業さえ、今のスタイルではとてもやれなくなる。だから、化石資源(太古の光合成活動の遺産)に代わるエネルギー源を確保しないかぎり、人間社会の「持続」などありえない。

現時点でただひとつ考えられるのは、「今の太陽」でやっていく社会である。幸い、前述のように、地球表面に降り注ぐ太陽光エネルギーは、現在の世界エネルギー消費量のほぼ10000倍はある。

「今の太陽」が進めてくれる光合成では、陸上と海洋を合わせると入射エネルギーの約0.1%(1000分の1)が有機物(バイオマス)の化学エネルギーとして固定されるから、世界エネルギー消費量の10倍はある。海洋(全体のほぼ3分の1)や深山幽谷のバイオマス生産は部分的に利用できないとしても、たぶんやっていける、というのが筆者の予測だ。バイオマス生産(光エネルギーの利用)に加えて、水力発電や風力発電(太陽熱エネルギーの利用)もそれなりにあるし。

少し長い目で未来を見るなら、こうした「バイオマス・エネルギーシステム」についての真剣な論議をなるべく早く始めるべきだと思うのだけれど、残念ながらこの「石油漬け」時代、気運はまだ盛り上がっていない。今後に期待する(自戒をこめつつ)。

「今の太陽」のほかにもありうるオプションは、核エネルギーだけ。ただし、今までどおりの軽水炉発電は無力である。高速増殖炉が(いろいろな意味で)うまくいけば、

1000年スケールの「持続」はありうる。また、核融合が(今の調子ではまだ先が見えないものの)成功したら、それがたぶん最善のオプションだろう。

### 8. 再び太陽について

未来の太陽を考えたついでに、「今の太陽」をめぐる議論・企てのうち、筆者が大いに疑問視しているものを指摘したい。ひとつは太陽光発電、もうひとつが「CO<sub>2</sub>の固定化研究」である。どちらも「持続可能性」論にからめて華々しく喧伝する向きもあるが、はたしてどれほどの成算があるのだろうか?

太陽光発電は、発電システムをつくるのに投入するエネルギー(つまりは石油)を分母、システムが寿命内に生む電気エネルギーを分子にした分数(産出/投入比)を考えたとき、その値が1をかるく超しているやっと思ってもつ。推進側の方々は「すでにそうなっている」と胸を張り、そうでない方々(ことに、核融合研究者など)は「とてもまだまだ」とおっしゃる。分母の値は、シリコン鉱石の採掘・輸送・精製・加工と、発電システムの組み上げ、立地の整備などをすべて含むから、かなりの大きさになるはずだ。また分子の値は、太陽光エネルギー密度と、寿命(10年内外)から簡単にはじける。

正確な判断ができるデータは筆者もあいにく知らない(アクセスできない)のだが、某企業(太陽電池には直接かかわっていない企業)のデバイス開発研究者のご意見をきいたり、家庭電力の一部をまかなう半額政府補助のソーラーシステムが数百万円もする事実、ソーラーカーが数千円レベルだという事実、あるいは「太陽光発電所」が自己増殖したという話を聞かない事実などを総合すると、現時点でやはり産出/投入比はまだ1に届いていないのではないかと想像している。かりに1でも、火力発電のエネルギー効率(40%未満)を考えれば、太陽電池をつくらばつくるほど(石油を直接燃やすのに比べて)エネルギーは損するし、3倍ほど多量のCO<sub>2</sub>を出している勘定になる(まあCO<sub>2</sub>放出は、前述のとおり、今いちばん緊急の課題である作物生産にはプラスだから、その意味で太陽光発電は「クリーン」と言えなくもないのだが)。

もうひとつ、某お役所の肝煎りでだいたい前から巨額予算がつぎこまれていた「CO<sub>2</sub>固定化研究」は、まさに「?!」そのもの。まず、電気エネルギーとか熱エネルギーとか、人為エネルギーをつかう手法は、噴飯ものでしかない。CO<sub>2</sub>は炭素1個の物質としていちばん安定なものだから、メタンやメタノールにするには、しかるべきエネルギーの投入を要する。そのエネルギーは、たとえば源が天然ガス(主成分メタン)なら、メタンをCO<sub>2</sub>に変えて得たものだ。そのため、万事が順調に進んだとしても差し引きはゼロだし、エネルギー損失は必ず起こるので、結局のところエネ

ルギーを無駄に捨てることでしかない。

唯一ありうるのは、無償の太陽光エネルギーをつかう光化学変化で固定する道。しかしそれも、現実の姿を少し思い浮かべてみれば、装置の建設や維持管理、植えつけや収穫などかなりのエネルギーをつぎこまなければ無理だろう。だいたい、わが国だけみても年間 12 億トン（ひとり 1 日平均 27 kg）の CO<sub>2</sub> を、かりにその 1 割でも植物に吸わせようとする企てがどれほど常軌を逸しているか、冷静に当たってみればすぐわかるはず。

### 9. お わ り に

こうした話を書いたり語ったりするといつも気が滅入るのだが、化石資源という禁断の実を味わった、あるいはパンドラの箱を開けてしまった人類は、たかが過去 200 年ほどのうちに、小手先的手段ではどうしようもない近未来をかかえてしまった。50 年先（時間を逆行させれば、ちょうど筆者が生まれた年になる）までなら、小手先で大丈夫かもしれない。その少なくとも 1 桁は長い先を見た議論が湧くのを期待するのみ。

もうひとつ、環境問題や持続可能性論議にかぎらず、わ

が国が相変わらず舶来思潮の翻訳・紹介、舶来科学技術の改良工夫に終始している現実はなんとも怖い（たとえば、細分するとおそらく 1000 種類は超す科学機器のうち、原理が国産のものは依然として皆無）。「百年の計」を立て、初等中等教育を基礎から改革すべきなのに、2002 年から走る新教育課程は、有馬文部大臣には申し訳ないが、子供の知力をますます下げようとするものにしか見えない。折りにふれてささやかな抵抗を試みてはいるのだが。

(1998 年 10 月 12 日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 安井 至：『市民のための環境学入門』，丸善（1998）。
- 2) C・ボンティング著，石 弘之訳：『緑の世界史・上』，p. 149，朝日新聞社（1994）。
- 3) 渡辺 正：生産研究，49（10），p. 473-483（1997）。
- 4) エネルギー変換懇話会編：『エネルギー工学総論』，p. 4，オーム社（1979）。
- 5) M・ペルーツ著，中馬一郎訳：『科学はいま』，p. 62，共立出版（1991）。
- 6) 矢野恒太郎記念会編：『世界国勢図会'97/98』，p. 233，p. 291，国勢社（1997）。