

原理の理解と地球温暖化問題

東京大学大学院工学系研究科教授 小宮山宏

1. 複雑な問題と単純な原理

宇宙船地球号にほころびが生じ始めている。環境をどう維持するのか、化石資源に代わるエネルギーを何に求めるのか、といった人類の生存基盤に直接関わる問題に対する解を求められているのだ。地球環境問題の背景は広い。CO₂による地球温暖化の問題は特にそうだ。気象、生態、産業、技術から、政治、経済、倫理といったものまで、さまざまな要因が関係している。一人の人間の理解力を越えているのではないかとさえ思われる。しかし、基礎的なことをしっかり考えれば大きな間違いは犯さない。自然的側面に限れば、その原理は、エネルギーと物質の保存則である。

これらは、新課程で設けられた科目「理科総合A」において取り扱うテーマでもある。

ここでは、地球温暖化問題を例に、複雑な問題において基本的な原理がいかに重要であるかを示し、それを学生に教えるために私自身がどのような工夫をしているかをご紹介します。もう少し詳しくという方は、拙著(参考文献1)-(3)などをご覧ください。

2. アマゾン地球の肺ではない

植物は二酸化炭素を吸って酸素を吐く。だから、熱帯雨林は地球の肺である。それを伐採すると酸素が減少してしまう。多くの本にそう書いてあるが、これは誤りである。

一本の木に着目してみよう。種から芽が出て成長して若木になり、だんだん大きくなってやがて成長が止まる。木の成長を支えるのは、吸った二酸化炭素と水から光合成でできる炭水化物である。二酸化炭素CO₂を吸って酸素O₂を吐き、炭素Cと水からできている炭水化物が蓄積するのである。炭水化物は、その一部が植物の呼吸のためにも使われる。この分は燃えてCO₂とH₂Oに戻ってしまう。結局正味としては、成長する分だけ、植物は二酸化炭素を吸って酸素を吐くのである。

それでは、アマゾンの木は成長しているだろうか。

100年前のアマゾンは裸地で、そこから木の芽が出て成長してきたのだろうか。そんなことはない。はるか昔からアマゾンは今のままだったのだ。最近開発で木が減っていることはあっても、アマゾンの面積が増えたり木の量が増えたりしているわけではない。成長していないのだから、炭水化物を蓄積しているはずはないのである。

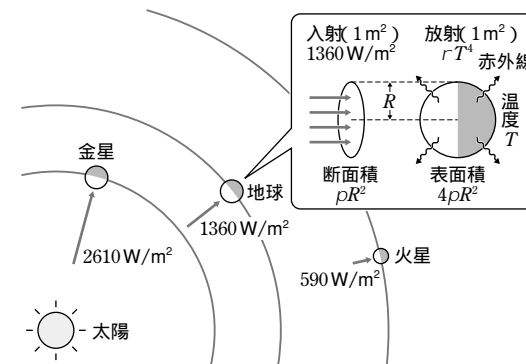
事実はこうである。春から夏にかけて、光合成で葉が茂る。CO₂を吸ってO₂を吐く。しかし、秋には葉は落ちて、虫や土壌細菌に食われたり、腐り、酸化され、最後には二酸化炭素と水に戻ってしまう。木が吸うCO₂と同じ量だけ、土壌が吐き出しているのである。木が吐き出す酸素を土壌が吸っているのである。一年経ったとき、物質の出入りは全体としてゼロである。熱帯雨林に限らず、成熟した森は肺ではない。地球に肺はない、平衡状態にある。

3. 基本的なことをていねいに考える

唐突な例と感じられたかもしれない。その真意は、身近な例の中に基本的な原理が顔をのぞかせていること、それを理解するためにそんなにたくさんの知識が必要なわけではないことを述べたかったのである。アマゾンが地球の肺であるというのは、専門家もついうっかりする誤解である。これを正しく理解することは、現在科学者が血眼になって研究している地球の中の物質の循環を理解するのに不可欠なのである。必要な知識は、核反応が量的に無視しうる地球環境において、CやOやH等の原子は増えも減りもしないということである。CO₂を吸ってO₂を吐くならCがたまるはず。そのことに確信を持つなら、成長していないアマゾンが地球の肺であるという論理に疑問を感じるはずだろう。

4. 地球の温度

温暖化を考える際の基本は、地球の温度である。大気がない場合の惑星の温度は簡単に計算できる。原理は、惑星が宇宙という真空中に浮かぶ発熱しない球であること、暖めるのは太陽光、冷却は宇宙への



放射によるということである。表面温度は、たった一つの式で決まる。図1に示すように、地球に入射する太陽エネルギーと等しいエネルギーを宇宙に放射するように、地球の表面温度が決まるということである。入射が多ければ温度が上昇するし、少なければ低下する。

$$\rho R^2 \times (\text{太陽放射}) = 4\rho R^2 \times rT^4 \quad (1)$$

太陽放射は、大気圏外で太陽へ向けた垂直面での値1360 W/m²、rはStefan-Boltzman定数で、 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ である。この式から

$$T = \sqrt[4]{\frac{1360}{4 \times 5.67 \times 10^{-8}} \text{ K}} \quad (2)$$

Tは278Kとなる。これが、地球を、表面温度が均一になるくらいくると縦横に高速で回転する球だとしたときの、定常温度である。夜になれば入射がなくなるから冷えて、夜が明ければ暖まるし、極地は寒くて熱帯は熱いが、それらの平均値である。

これを学生に計算させる。電卓で、1360を4で割って、5.67で割って、ルートをとって2回たいて100をかけると。地球の温度はこんなに簡単な原理で決まっているのだとわかると、それまで、ボーっとしていた学生の目つきが変わる。そこで、月の温度は何度か？ 答えは278K。太陽と月の距離は、太陽と地球の距離とほぼ完全に同じだから、1360は等しく、(1)式は、温度Tが半径Rに依存しないことを教えるから。火星の温度は何度か？ 火星での太陽放射は、地球、火星の太陽からの距離を与えれば、地球の1360を使って590となるので、226K。実際は、228K。それでは、金星の温度は？ 328Kと計算されるのだが、現実には、703K。理由は、金星大気は90気圧のCO₂からなり、温室効果のために

こんなに熱くなっている。実は、地球も、現実の表面温度は288Kでこの差は…とったように話をもっていくと、学生は理解する。若者は、分かれば燃えてくる。

最後に理解させるべきは、水が液体状態にあるという生命にとっての僥倖が、太陽地球間の距離と1気圧の大気組成との精妙な組み合わせから決まるエネルギー収支によるということであろう。

5. エネルギー問題とエネルギー保存則

いうまでもなく、CO₂問題はエネルギー問題と表裏一体にある。しかし、エネルギーは保存されるのに、エネルギー枯渇の心配をしなければならないのは一体なぜだ。省エネルギーとは、いったい何のことだ。保存されるなら、節約もなにもないだろう。

これは、真剣に考える人ほど感じる疑問なのだが、きちんと答えられるひとは極めて少ない。基本的な原理の組み合わせに過ぎないのに、それらをきちんと丁寧に考える習慣が身につけていないのである。

たとえば、(1)式は、図1の幾何学的関係とエネルギー保存則が基礎である。表面温度が一定ということは、地表域のエネルギーが増えも減りもしないということだから、入射エネルギーと放射エネルギーは等しくなければならない。また、火星の太陽放射を求めるのは、太陽を中心として地球の距離の球面を通過するエネルギーが、火星の距離の球面を通過するのだから、エネルギーが保存されるのだとすれば、面積の比、つまり距離の2乗に反比例するというだけのことである。

しかし、なんだか当たり前すぎて、学生はなんだそんなことかと馬鹿にする。驚かさないと、目が覚めない。そこで、工夫をする。

1kwの電気ヒーターをつけるのと、テレビとステレオと掃除機と照明全部で1kwをつけるのと、部屋の暖房効果はどちらが大きいのか。熱力学的理由と共に述べよ。

これは、大学1年生に出した熱力学の期末試験の問題である。正解は、「ほぼ同じ。消費電力は音や光や運動エネルギーを經由して最後は熱に変わり、その際保存則が成り立つから。ただ、後者では、外から音が聞こえたり、照明の光が見えたり、一部は戸

外で熱に変わるから』。同じという正答は30%くらい、完全に近い答えは、約200名中一人であった。この問題は、後で明らかになるように、省エネルギーの基本原則を教えるのである。

この他にも、エネルギー保存則を理解させるのによい問題を用意していて、1時間くらいかけて考えさせている。例えば、

暑いクーラーがないので、冷蔵庫のドアを開きっぱなしにした。部屋の温度は上がるか、下がるか？ 部屋は断熱されていると仮定して、温度変化を求める式を記述し、変化の概要を図示せよ。

エネルギーは保存する。しかし、掃除機を動かした後、電気はなくなる。この矛盾を、熱力学および分子論的に説明せよ。

風呂をわかすのにガスを使うのがもったいないので、かき混ぜてお湯にすることにした。この方法の妥当性を熱力学的に論ぜよ。妥当だとすればどのくらいの時間でお湯が沸くか計算せよ。

6. 理論と現実と技術革新

……海水淡水化の例

半透膜を隔てて海水と真水をおくと、真水が海水側にしみこむ。このときの浸透圧は、海水だと24気圧。海水の側に24気圧かけると真水はしみこめなくなる。もっと圧力を増すと、海水の水が真水側にしみ出す。これが、逆浸透法による海水淡水化の原理である。現在は、80気圧の圧力をかけて実施している。24気圧よりほんの少しだけ大きい圧力で行えば、 $24/80 = 30\%$ のエネルギーですむのに、なぜ80気圧もかけるのだろうか。それは、十分な速度で真水を得るためである。透過の摩擦抵抗の小さい、薄くて強い半透膜があれば、圧力を下げられる。現在、50気圧を目標に技術開発が行われている。実現すると、エネルギー消費は8分の5に低下する。技術革新の限界は30%までである。

理論の素晴らしいところは、30%という理論値は技術の具体的方法によらないことである。淡水化は、逆浸透法以外に、蒸留でも、氷にして塩をふる

い落として融かすことでもできる。どんな方法もちいても、海水から真水を作るための最小のエネルギーは、24気圧×真水の体積である。

これが、省エネルギーの理論と現実と技術革新の関連の典型例である。

7. 自動車の省エネルギー

世界のエネルギー消費の30%を占めるから、自動車の省エネルギーは重要である。この問題を、理論、現実、技術革新という、淡水化で示した思考過程で考えてみよう。

まず、理論による最小エネルギーはゼロである。つまり、淡水化の24気圧×体積に相当する値はゼロ、ガソリン全てが省エネルギーの目標値なのである。

理想は、摩擦のない自動車なのである。電気自動車を想定すれば、蓄電池からの電気ですtartする。摩擦がなければ、電気が等量(ジュール)の運動エネルギーに変わる。等速になったら、電気はいらない。スケートのように滑るように走る。止まるときには、発電機を回して、運動エネルギーを電気に変換して蓄電池に充電する。電池の充電状態はスタート時に戻る。

理論と現実の差は、海水淡水化でも自動車でも、すべて広い意味での摩擦によるのである。ガソリンが仕事に変換され、仕事が摩擦で熱に変わる。仕事に変換するところで、化学的な広義の摩擦で70%程が熱になり、残りは主としてタイヤと地面の摩擦で熱に変わる。

図2に示すように、車のガソリン消費は、車体重量に比例する。摩擦が重量に比例するからである。直噴エンジンは、同じ重量でも20%近く省エネルギーなのは、ガソリンから仕事への変換効率が高いからである。ハイブリッド自動車は通常車の半分くらいの消費である。理由は、停止時にはエンジンを切るなど、できる限りエンジンを効率の高い状態で駆動させ、エンジンの馬力が足りないときは蓄電池から放電して補い、多すぎるときには充電に使うという原理である。

例えば、アルミニウムや炭素繊維などを使って重量を2分の1にしたハイブリッド自動車を考えれば、現在の通乗車の4分の1のガソリンで同じ性能が出せる。自動車の省エネルギーは信じられないくらい

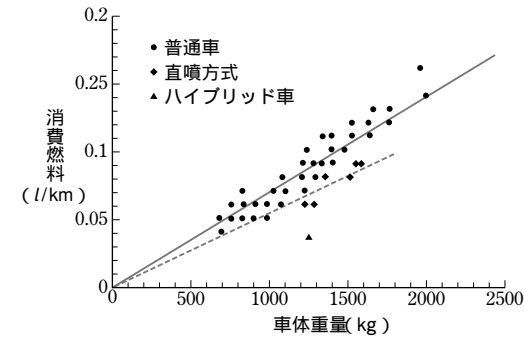


図2 自動車の1km走行に必要な燃料量(『自動車ガイドブック1998-1999』自動車工業振興会、のデータをもとに作成)

進むと、私は確信している。それは、理論、現実、技術開発という論理的思考の帰結だからである。

「自動車のエンジンは、100馬力くらいが普通。馬体重500kgのサラブレッドが、時速60kmを超えて走る。ちょうど、軽自動車に匹敵する走行だ。馬は、たった1馬力、車の100分の1のエネルギー消費で走っているんだ。その秘密は、地面との接触面積だ。タイヤと比べてみたまえ。馬は、蹴って飛んで、蹴って飛んで、実質的にはほとんど飛んでるんだ。摩擦は空気との摩擦くらいだから、効率が良いんだ。自動車は、まだまだ、省エネルギーの余地があるんだ」といった話をすると、学生は真剣に聞く。そして、演習をさせれば、基礎の力が付く。

エネルギーは量的には保存されるが、電気や仕事や高温といった使えるエネルギーが、環境と同じ温度の熱となって使えなくなる。熱に変わるまえに、できるだけ多く使うこと、それが省エネルギーである。1kwの電気ヒーターより、テレビと掃除機と全部で1kwの方が、省エネルギーなのである。

8. 原理の理解と基礎の力

さて、人類が1年に燃やす化石資源が60億トンで、これがCO₂濃度を上昇させている。したがって、CO₂濃度の上昇を避けたいとすれば、CO₂を固定するか、化石資源の燃焼を減らすしかない。この問題の技術的な解は、固定と省エネルギーと非化石系エネルギー資源の開発なのである。

温暖化問題におけるCO₂の固定とは、陸か海の炭素量を増やすことである。アマゾンを守ることは炭素放出を防止することにはなるが、炭素固定になるわけではない。草原をブッシュにすること、ブッシュを森林にすること、それが、陸への固定である。

理想的には、砂漠を森にすることである。それは難しいことではない。湾岸諸国でやっているように、海水を淡水化してその水を灌水して森を作ればよい。しかし、CO₂対策としては失格である。淡水化するために使うエネルギーから放出されるCO₂は、それでできた水で育つ木が固定するCO₂よりも多いのである。この話の基本を理解する原理は、物質とエネルギーの保存則である。

エネルギーに関して、熱力学の第2法則とも関連してはいるのだが、ここで述べたように第1法則だけで十分理解できる。

環境問題は複雑である。だからこそ、基本原理から理解する姿勢が必要になる。ここでの議論は、多少粗すぎる点もある。拙著(参考文献1)~(3)など)では、もう少し精密な議論を展開していることを申し添えたい。

高度に発達し、巨大化した科学技術が、われわれの存在基盤そのものを危うくする可能性を否定することはできない。しかし、人類は、自らが作り上げた科学技術を、その英知によって、より快適な地球環境の創造に向かわせることができるはずであろう。そのためには、多くの人々が基本的認識を共有する必要がある。鍵は原理の理解だ。これが、筆者の基本的立場である。

主な参考文献

- (1)小宮山宏:地球持続の技術, 岩波新書(1999)
- (2)小宮山宏:地球温暖化問題に答える, 東京大学出版会(1995)
- (3)小宮山宏:入門熱力学, 培風館(1996)