

第 11 章

熱力学からみた地球 環境・エネルギー 問題の本質

地球環境・エネルギー問題は、現在の人類が抱える最大の課題の一つである。日本の政府も、2050年までのカーボンニュートラル実現、レジ袋の有料化、自然エネルギー活用の拡大など、地球環境・エネルギー問題に関わる政策を次々と打ち出している。図 11.1 に、主な問題をあげておいた。陸・海・空(宇宙)のすべてに、その問題は広がっている。広範囲で、脈絡の無いさまざまな問題が出ているように見えるが、これらの諸問題の根は一つである。それを本章で示したい。

本章は、筆者の考えを述べたもので、熱力学のどの教科書にも出ていない内容であることを初めにお断りしておく。ご了承いただきたい。

11.1 熱力学からみた地球

*1 よく天気予報で、「明日の朝は晴れるので、放射冷却により寒くなるでしょう」という表現が使われるが、この放射冷却が宇宙空間への放出される輻射熱である。

熱力学に見れば、地球は、エネルギーの出入りはあるが物質の出入りの無い閉鎖系である。流入するエネルギーは太陽光で、出ていくエネルギーは輻射熱^{*1}である。物質の出入りについては、時々隕石が落ちてきたり、人工衛星が飛び出していったりするが、地球の質量からみれば無視できる量なので、出入りは無いと考えてよい。

太陽光によって流入するエネルギーの量と、輻射熱によって出ていくエネルギーの量は等しい。そうでないと、地球がどんどん熱くなったり冷えたりしてしまう。出入りするエネルギーの量は同じであるが、質が異なる。太陽光は、太陽表面の温度 6,000 K と平衡にあるスペクトルを有している(コラム 11.1 参照)。一方、地球から出ていく輻射熱は、地表温度 \sim 300 K と平衡になっている光(目には見えない電磁波)のスペクトルを有している。いわば、流入するエネルギーと出ていくエネルギーには、大きな温度差がある。ここまで熱力学を学んできた皆さんは、この温度差が仕事として取り出せることに気づかれたのではないだろうか。そう、カルノーの熱機関である。もし地球を熱機関とみなすなら、6,000 K の高熱源から熱を取り込み、300 K の低熱源に熱を捨てて作動する熱機関になる。この熱機関の最大効率 η は $(6,000 - 300)/6,000 = 0.95$ で、たいへん効率のよい装置である。

地球上のすべての生物の生命と子孫の再生産が、この高効率な熱機関によって維持されている。これが、熱力学的にみた地球上での営みである。以下では、この考えを詳しく説明しよう。



図 11.1 種々の地球環境・エネルギー問題

コラム 11.1 光と温度は平衡になる

11.1 節で、太陽光は太陽表面の温度 6,000 K と平衡にあるスペクトルを有し、地球から出ていく輻射熱のスペクトルは地表の温度 ~ 300 K と平衡になっていると述べた。“光と温度が平衡になる”という意味をここで説明しておこう。この現象を最も身近に経験するのは電子レンジである。電子レンジは、マイクロ波(可視光よりも波長の長い電磁波)によって、その波長の電磁波と平衡になる温度に食品を温める機器である。光と温度の関係を説明するときによく例にあげられるのは、熱せられた鉄の色である。刀鍛冶や製鉄所における高温の鉄は、温度が高いほど白っぽい(青っぽい)色となり、低いほど赤い色になる。夜空に輝く星の色も同様である。つまり、高温であるほど波長の短い(エネルギーの高い)光を発し、低温程長い波長の光を出すのである。

光と温度の平衡は、分子振動や原子中の電子の運動を介して成り立つ。光とは電磁波で、電場が規則的に振動する波である。よって、分子や原子に光が当たると、その中の荷電粒子に力を及ぼして揺さぶることになる。例えば、水分子は酸素原子がやや負に帯電し、水素原子がやや正に帯電している。したがって、この水分子が電場の中にいると、酸素原子も水素原子も力を受ける。電磁波の場合は電場が振動しているので、受ける力も振動して原子が揺り動かされる。実際には、水分子の OH 結合の伸縮振動や、HOH の結合角の振動(変

角振動)となる(図)。分子振動(運動)の激しさの程度は、すなわち温度にほかならない。つまり、光(電磁波)は温度を変化させる。水分子の変角振動に適合した波長の電磁波で食品を温める器具が、電子レンジである。一方、ある温度で分子が振動していると、電荷が(加速度)運動していることになる。電荷の加速度運動は電磁波を発生する。放送局における電波の発生や、シンクロトロンによる放射光の発生を思い浮かべれば納得できるであろう。つまり、温度は(分子の振動を通じて)電磁波を発生させる(図)。このような機構により、光(電磁波)と温度は平衡になる。ここまで、水分子の振動を例にして電磁波と温度が平衡になることの説明をしてきた。しかし、もっと高温の平衡では、分子運動ではなく、電子の運動がその役割を担う。鉄の温度と色の関係は、鉄原子の電子の運動によってもたらされる光と温度の平衡関係なのである。

もしすべての波長の光(電磁波)を吸収する物質で中が中空の球体を作り、その球体のある温度に保ったとする。球体内では、その物質の分子振動によって電磁波が発生し、その電磁波は球体の別の場所で再びその物質に吸収されるであろう。一定時間の後、発生する電磁波と吸収される電磁波は平衡状態になる。このときの電磁波の波長分布は、温度に依存している。その関係式が有名なプランクの公式(法則)である。そして、この現象を黒体放射と呼ぶ。

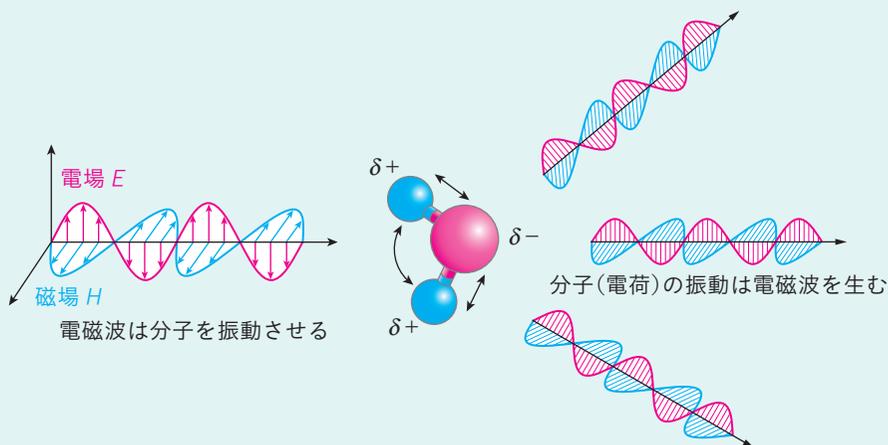


図 光(電磁波)と温度が平衡になる理由を説明する図

11.2 地球上におけるエネルギーの流れと物質循環

地球上におけるエネルギーの流れと物質循環の概念を図 11.2 に示す。まず、エネルギーの流れから見ていこう。太陽光の流入と輻射熱の放出によるきわめて高効率な熱機関を地球上で利用しているのは植物である。植物は、この熱機関を利用して、太陽光のエネルギーを化学エネルギーに変換する。すなわち、光合成により低エネルギーの(そしてエントロピーの大きな)二酸化炭素と水から、高エネルギー(で低エントロピー)のグルコースを生産する。地球上のすべての生物は、植物が合成したグルコースをエネルギー源として生き延びている。グルコースを代謝して、生体内のエネルギー通貨とも言うべき ATP を合成し、その ATP のエネルギーを利用してタンパク質の合成や細胞膜電位の維持などの生体に必要な活動を行っている。グルコースの有する化学エネルギーは、この間に段階的に熱エネルギーに変換されている。したがってエネルギーは、太陽光 → 化学エネルギー(グルコース) → 熱エネルギーと流れ、最後は宇宙空間に輻射熱として放射される。

一方、物質の循環について考えると、植物の合成したグルコースを利用して動物や植物が個体の維持と再生産を行った結果、グルコースは再び二酸化炭素と水に戻る。動物や植物の個体そのものも、やがて死ねば、微生物の働きによって二酸化炭素と水に戻る。動物の排泄物も同様である。このように地球上の物質は、二酸化炭素+水 → グルコース → タンパク質などの生体物質 → 二酸化炭素+水と循環している。

上記のエネルギーの流れと物質の循環が続いている限り、地球上の生物界は定常状態に保たれ、何の問題も起こらないはずである。先に述べ

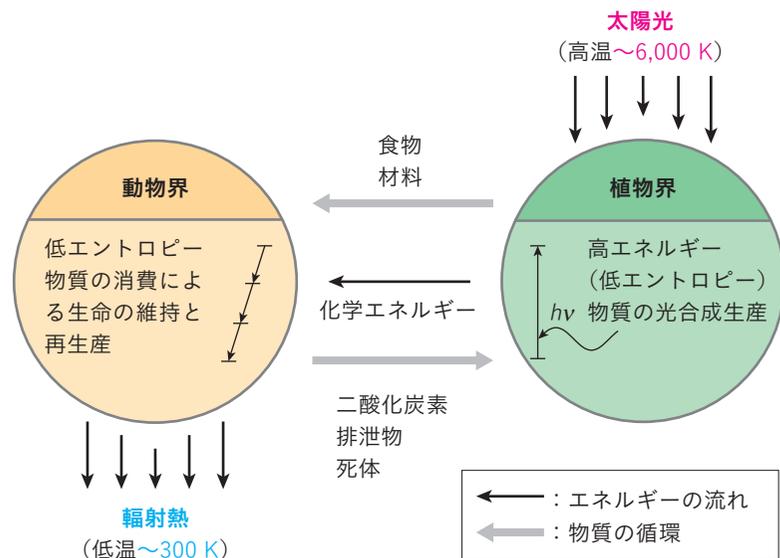


図 11.2 地球上におけるエネルギーの流れと物質循環

た地球環境問題やエネルギー問題が発生するのは、この物質循環に異常を来したからである。その原因が、人類による化石燃料と化石資源の大量かつ短期間による使用である。次にその問題について述べよう。

11.3 化石燃料/資源の大量消費による物質循環の破綻

約 20 万年前に人類(ホモ・サピエンス)が地球上に現れる以前は、当然、前項で述べた地球上の物質循環は何の問題も無く行われていた。人類が現れてからも、狩猟・採集による生活が営まれていた非常に長い期間は、やはり同様であった。しかし、約 1 万年前に、牧畜・栽培(農耕)社会に入り状況は一変した。自然が、人類によって改変され始めたのである。環境問題の原点はここにある。その後、人類のより豊かで快適な生活の追求はとどまるところを知らなかった。そして、18 世紀の半ばから産業革命が始まったのである。産業革命の推進に最も貢献したのは、化石燃料/資源(当時は石炭)であった。ここに、化石燃料/資源の大量かつ短期間の使用が始まった。

動物(人間)界における化石燃料/資源の大量かつ短期間の使用によって、物質循環の回転に問題が生じた。動物界から植物界に流れる CO_2 が、植物界で吸収できる限界を超えてしまったのである。ここに地球環境・エネルギー問題のすべての原因がある。図 11.3 にこれら諸問題の相関を示した。化石燃料をエネルギーとして大量に使用した結果、 CO_2 の問題が発生して地球温暖化をもたらしている。特に自動車社会の高度な繁栄が、この問題に与える影響が大きい。加えて、化石燃料に少量含まれる硫黄や窒素は酸性雨をもたらす。一方、化石資源を利用して天然物

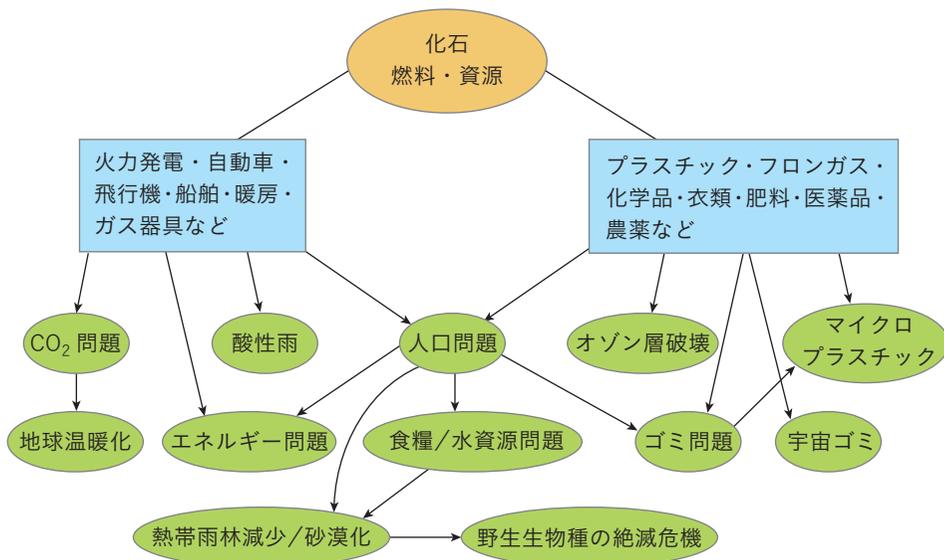


図 11.3 化石燃料・資源の大量かつ短期間の使用によって発生する諸問題の相関

コラム 11.2 世界の人口推移

世界の人口は2011年頃に70億人を超え、2022年に80億人に達した。人口推移は普通、200～300年くらいのスパンで見ることが多く、産業革命以後の増加率が高いなどの事実を知る。しかし、これを人類史の時間スパンで見ると図のようになる。約20万年前にアフリカで出現した現生人類(ホモ・サピエンス)は、約5万年前に世界中に移動を始めた。紀元1年頃には2億人ほどになり、1850年頃に10億人に達した。人口は産業革命の進展とともに急増し、1900年付近からグラフはほとんどまっすぐ上に向かって上昇する。まっすぐ上に向かって上昇する：これは、その現象がカタストロフに至る場合の特徴である。例えば、相転移のときにある種の物性値(熱容量や圧縮率など)は、無限大に発散する。言い換えれば、これらの物性が発散するときには、固体から液体に、あるいは液体から気体に状態が一変する。バブル

経済期の株価も、ほとんど真上に上昇している。その後、バブルが崩壊したことはご承知の通りである。人口推移曲線におけるカタストロフとは何なのか？ 人類の絶滅でないことを祈りたいものである。

人類だけが、昨日よりは今日、今日よりは明日、より豊かでより幸せになりたいと考える。その進歩の概念が、狩猟・採集社会から牧畜・栽培(農耕)社会へ、さらに化石燃料/資源をフルに利用する産業革命へと社会を進展させた。今も、経済成長を目指さない政権はない。しかし、他の動物は決してそのようなことは考えず、本能に従い、日々の同じ生活の繰り返しを全うしている。それが動物の生きていく本来の姿であろう。人類も、同じことの繰り返しだが、生活の本来の姿であることを知らねばならない時ではないだろうか。



図 人類史の時間スパンでみた世界人口の推移

[国連人口基金東京事務所資料より：<https://tokyo.unfpa.org/ja/publications/>]

にはないプラスチックなどの新しい物質群を作り出した。プラスチックは微生物による分解が行われず、ゴミ問題を引き起こした。海に流れ出したプラスチックは、波に揉まれてやがてマイクロプラスチックとなり、魚や海生動物に悪影響を及ぼしている。フロンガスもまた、化石資源から合成された天然にはない物質である。フロンガスが、オゾン層の破壊に深く関与していることはよく知られている。

化石燃料と資源によって豊かになった人類は、人口を爆発的に増加させた(コラム 11.2 参照)。化学肥料や農薬の開発および農機具の発展による食糧の増産、医薬や医療の発達による病気の克服などが大きく貢献している。人口の増加は、種々の地球環境問題に関係している。人類の生活圏の拡大によって、熱帯雨林が農業用地に変換されて減少する。熱帯雨林の減少が砂漠化を引き起こす。それがまた、野生生物種を絶滅の危機に陥れる。人口の増加は排出されるゴミの増加につながり、ゴミ問題が発生する。爆発的に増えた人口を養うために、さらなる食糧と水が必要になる。しかし、水道の蛇口をひねれば飲める水の出てくるインフラが整っているのは、先進国のみである。もしいまのままでエネルギーを石油に頼るなら、いずれ枯渇してエネルギー問題が発生する。

図 11.3 をじっくりと眺めていただきたい。広範囲で脈絡の無いように見える諸問題は、一つの根から出ていることがわかるであろう。化石燃料/資源の使用を続ける限り、地球環境とエネルギーの諸問題は解決できないのである。では次に、これらの問題を解決するための具体的な方策を探ってみよう。

11.4

地球環境・エネルギー問題を解決する具体的方策

本節では、地球環境とエネルギーの諸問題を解決するための具体的方策について述べてみたい。その前に、一つの事実をあげる。それは、植物が利用している太陽光のエネルギーは、地球上に降り注ぐエネルギー量のわずか 0.1% にすぎないということである。先に述べたように、太陽光のエネルギーがすべての生物の個体の生存と再生産の維持を支えている。ついでに言うと、全人類が使用しているエネルギーを賄うためには、地球上に届く太陽光の 0.01% 程度の利用で足りる。つまり、植物が利用している太陽光エネルギーをもう 1 割増やせば(0.1% → 0.11%), エネルギー問題は解決することになる。問題解決の方策はこのように単純である。単純ではあるが、やさしくはない問題だということを最初に述べておきたい。

地球環境・エネルギー問題の本質が、化石燃料/資源の大量かつ短期間における使用にあるとすれば、問題解決の方策も自ずから明らかである。つまり、“エネルギーは太陽光から、資源は天然物から”という方針が答えであろう。もし資源をすべて天然物で賄うことができれば、廃棄後に出る CO₂ はもともと植物が空中から固定化したものであるから、CO₂ が増加することにはならない。これがカーボンニュートラルという言葉の意味である。つまり解決策は、**図 11.2** 中の物質循環のパイプを太くして、現在の人口を支えるだけの循環を再構築することである。ではその具体的方策を、植物界から動物界に流れる資源の供給パイプと、動物界から植物界に戻る二酸化炭素の回帰パイプに分けて考えてみよう。

11.4.1 資源の供給パイプの増強策

資源の供給パイプの増強策としては、現在、化石燃料/資源に頼っている分を、天然物で賄うことが主眼である。化石燃料/資源の利用によって増加した現在の人口を養うためには、(1)太陽光のエネルギーをより多く(生体)物質の生産へ流すこと(現在利用されている 0.1%を可能な限り増やす)、(2)より多くの天然物を人間の社会活動へ流すこと(自然に朽ちて再び二酸化炭素と水に戻る前に社会資源として利用する)が必要である。このうち(1)については、砂漠の緑化、海洋牧場/農場の開発などが考えられる。(2)については、非常に多くの可能性がある。しかも課題の大部分が、化学によって達成される可能性が高い。具体的な課題については、後に詳しく述べたい。

A. 太陽光のエネルギーをより多くの(生体)物質生産へ

現在植物が利用している 0.1%の太陽光のエネルギーを、可能な限り多く物質生産に回す方策である。具体的には、砂漠の緑化や海洋牧場/農場の開発などが考えられる。いずれも容易な策ではないが、実例と可能性について述べてみたい。

砂漠の緑化については、日本人医師である中村哲氏の実話(エピソード)をあげておきたい(図 11.4 参照)。中村氏は、医師として国内病院勤務の後、1984年に日本キリスト教海外医療協力会から派遣されてパキスタンのベシャワールに赴任した。以来、パキスタン・アフガニスタン地域で長く医療活動に従事していた。パキスタン国内では政府の圧力で活動の継続が困難になり、以後はアフガニスタンに拠点を移して活動を続けた。対テロ戦争の最中でも、アフガニスタンで医療活動を続けていたが、「この国ではどうして毎日患者が増えるのだろうか? 問題はどこにあるのだろうか?」という疑問を持ち始めた。中村氏がたどり着いた答えは、「水」だった。「水が汚い。下痢なんかで簡単に子どもが死んでいく。そういう状態を改善するためには、医者をも 100人連れてくるより水路 1本作ったほうがいい。」という結論に至った。



図 11.4 砂漠の緑化に貢献した中村哲氏(右)と用水路の一部(左)

山々の氷河を源流とする、アフガニスタン有数の大河クナル川は干ばつでも枯れることがない。この川の水を引き込む用水路を作る「緑の大地計画」を、2003年に発表した。水の届かない地域を潤す全長13kmの用水路を引き、周辺の土地と砂漠を農地に変えていく壮大な計画である。しかし中村氏は医師であり、土木建築では素人である。最初は手掘りで、スコップと人手で掘っていたそうである。現地の労働者を、1日1ドルか2ドルくらいのお金で雇った。最初100~200人だったのが、400~500人に増えていった。中村氏自身も、帰国するたびに書店を訪れ、土木に関する本を買い漁り、独学で勉強を重ねた。中村氏の出身地の福岡県を流れる筑後川の中流にある「山田堰」なども参考にしながら、2008年に、13kmの予定であった用水路は、25kmまで伸びて完成した。水路周辺約1万6千ヘクタールが緑化され、約65万人の自給自足が可能になった。

2019年12月4日、中村氏はアフガニスタンのジャラーラーバードにおいて、車で移動中に何者かに銃撃を受けて死去した。享年73歳。アフガニスタンのガニ大統領は、追悼式典で自ら棺を担ぎ、「彼は愛情深い人で、人生を全人類とアフガンに捧げました」と哀悼の意を捧げた。

中村氏の業績は、砂漠の緑化というたいへん困難な事業も、熱意と努力によって実現可能であることを示しており、勇気を与えてくれる。彼の献身的な働きに敬意を表するとともに、同じ日本人として誇らしく思うものである。

砂漠の緑化に関しては、もし実現可能ならば、最も有効なのは人工降雨技術であろう。雨を自在に降らせる技術ができれば、砂漠の緑化は容易に可能である。しかし、そのような技術は当分できるとは思えないが。

海洋牧場/農場の開発も、現在は、筆者の単なるアイデアにとどまる概念である。現在の海洋生物資源の利用は、漁業による魚の採取が中心で、植物資源としては昆布や海苔などを利用しているにすぎない。いわば、狩猟・採集段階の利用にとどまっている。そのため、乱獲によるマグロの資源枯渇のおそれなどの問題が発生することになる。ごく一部に、完全養殖マグロなどが出回り始めているが、まだ物珍しさによる人気を博している段階にすぎない。地上で牧畜や農業を行うように、海洋資源についても、もっと人為的/計画的に収穫する方法を開発するべきではないだろうか。

海洋牧場/農場には、陸上とは決定的に異なる利点がある。それは、“陸は二次元、海は三次元”である点である。陸上で牧場や農場として生産を行えるのは当然地表であり、二次元でしか利用できない。一方海は、深さ方向でも利用でき、三次元である。文字通り次元の異なる生産性が期待できるわけである。海洋牧場の名称で、魚の養殖事業が始まっているが、海洋農場とも言うべき植物資源についてはまったく手つかずの状態である。植物の生産するセルロースは、地球上における最大量のバイオマスである。セルロースを高度に利用する技術(後述)との組み合わせで、海洋農場における植物の栽培は魅力的である。ジャイアントケルブ



図 11.5 ジャイアントケルプ(和名：オオウキモ)の林

(日本語ではオオウキモ)という、長さ 50~60 m に達する世界最大の海藻が知られている(図 11.5)。しかも、その成長のスピードは著しく速く、1 日に 50 cm 近くも成長することもあるそうである。ヨウ素やカリウムその他のミネラルの含有量が多いことから、これら成分の利用が行われたり、アルギン酸の利用がかなり大規模に行われたりしてきたようである。しかし、この植物の本体であるセルロースを利用する目的で栽培された例はない。海洋農業は、何もジャイアントケルプに限ったことではないのは当然である。陸上の農業と同じように、海洋をもっと植物栽培に利用してよいのではなかろうか。

B. より多くの天然物を人間の社会活動へ

各種の天然資源は、自然のままに朽ちてしまえば、また二酸化炭素と水に戻るだけである。それを朽ちる前に人間の社会生活に利用して、化石資源の代わりに使おうというのが本項の主題である。化石資源の利用は多岐にわたるが、それらのそれぞれについて、天然資源に置き換えられる可能性について述べてみたい。また、現在の利用とは異なる天然資源の利用法についても考えてみたい。

・天然高分子材料の開発

ポリエチレンやポリプロピレンのような高分子材料の主な用途は、構造材料や容器である。これらの材料を天然物に置き換える場合には、セルロースが最有力候補である(図 11.6)。

日本では、昔から木造建築を発達させてきた。セルロースを構造材料として使う伝統があるのである。建築当初の出雲大社は、48 m の高さがあったと言われており、20 階建てのビルに相当する高さである。東京スカイツリーのような超高層建築は無理だとしても、木造でもかなりの高さの建物は可能であろう。セルロースから誘導される紙も、構造材

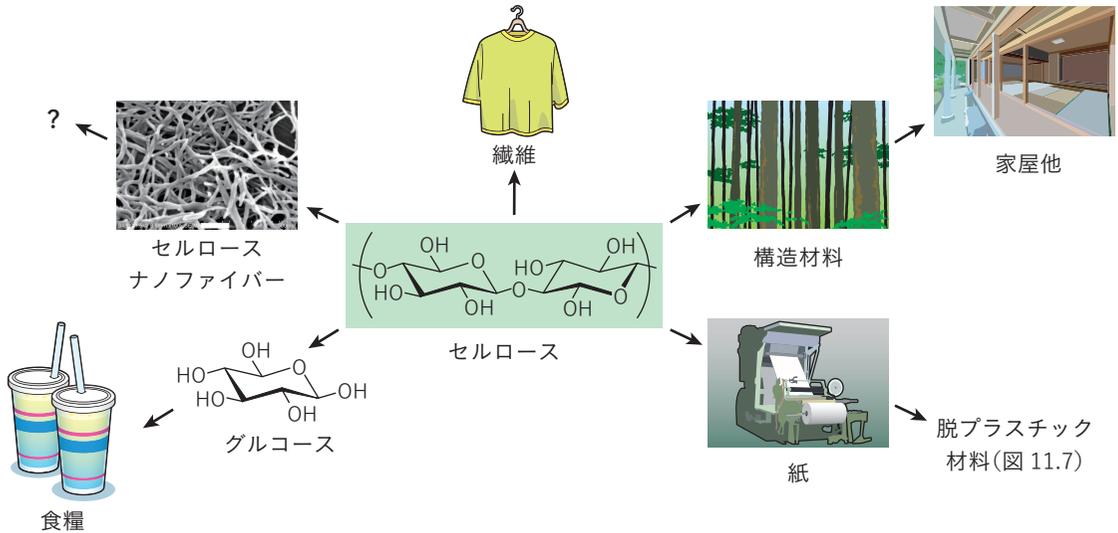


図 11.6 セルロース=地球上最大量のバイオマスの多角的利用

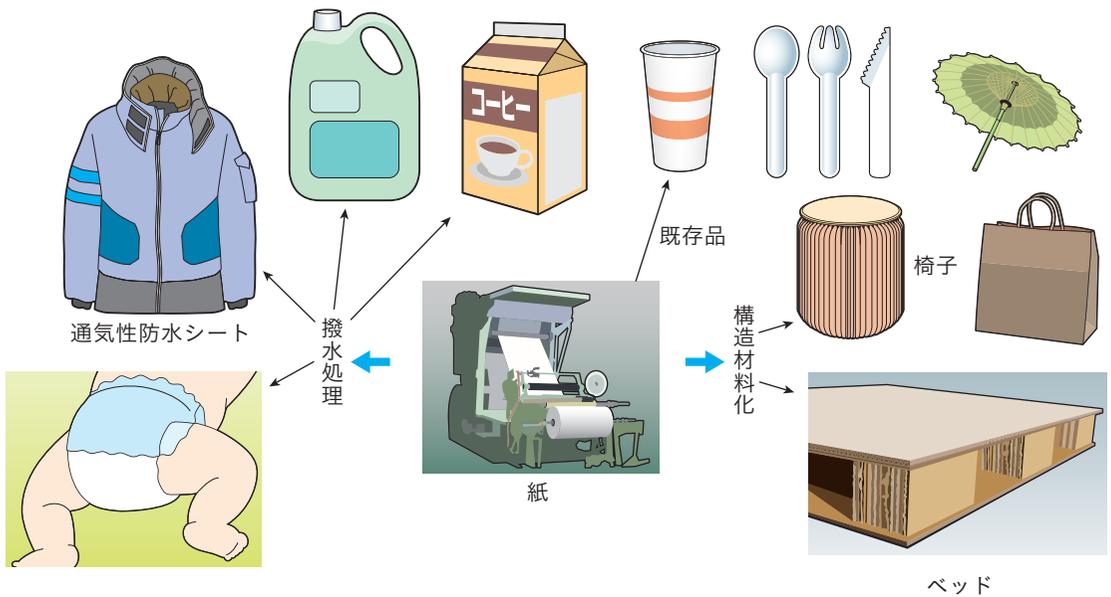


図 11.7 脱プラスチック材料の旗手としての紙

料として使える候補である(次項および図 11.7 参照)。

天然物で構造材料としての強度に耐えられると思われるものは、ほかにも多くある。亀やカニの甲羅、獣の角、爪、毛、骨、歯などである。これらの物質は、強度的には構造材料として耐えられても、そのままの形では広範な用途に適用できない。そこで問題は、これら天然物の加工技術である。化合物としては、キチン、ケラチン、それに骨や歯の主成分であるリン酸カルシウムなどであり、これらの物質に適した溶媒の開

発、可塑剤の開発、複合材料化技術が重要な課題となろう。特に骨や歯は、リン酸カルシウムとタンパク質などの巧妙な複合材料であり、人工的にこれらをまねた材料を合成する技術は、格好のターゲットとなろう。

高分子材料のもう一つの大きな用途は、繊維である。ナイロン、ポリエステル、アクリル繊維などは、衣類や毛布などに広く利用されている。これらを天然物に変換する技術が必要である。綿、羊毛、絹、麻などは古くから天然繊維として利用されてきたので、その方向はより強化すべきであろう。また、綿の主成分であるセルロースは、加工繊維(レーヨン)としても使われてきた(図 11.6 参照)。上述のキチンやケラチンなども、繊維として加工することが不可能ではないと思われる。良い溶媒の開発が技術のキーになるだろう。セルロースナノファイバーは、太さ 3~50 nm 程度の繊維である。鋼鉄の 1/5 の軽さで、5 倍以上の強度を有するとされている新しい素材である。特徴的な物性としては、例えば、(1)水分散体にすれば非常に高粘度で、チキソトロピー性^{*2}を有する液体が得られる、(2)nm オーダーの繊維なので、紙にすれば透明なシートが得られる、(3)高いガスバリア性がある、などの特徴を有する。現在はまだ研究段階であるが、将来どんな応用が拓けるかたいへん楽しみな、期待の大きい材料である。

***2** チキソトロピー：小さな力では移動や変形をしないために溶液は流動せず、一定以上の力が働いたときに初めて流動する性質のこと。

・脱プラスチック材料としての紙

化石資源から脱するための有力な一つの手段が、脱プラスチック材料の開発である。現在プラスチック材料が使用されている用途に、最も適した材料の一つは紙である。図 11.7 に紙の新しい用途の全体像を示す。紙は多孔質材料であるから、強い撥水処理を行えば通気性防水シートとして使用できる。通気性防水シートは、蒸れないレインコート(“ゴアテックス”の商品名で知られている)や使い捨ておむつの外装フィルムとして広く利用されている。特に、おむつは 1 回使用すれば捨てられる製品であり、紙で十分に耐えられると考えられる。撥水性と強度を工夫すれば、液体を入れるボトルやパックにも利用可能であろう。事実、牛乳パックやコーヒーパックは、現在すでに使われている。構造材料としても有望である。現在でも段ボールは、災害時のベッドや簡易トイレなどに使われている。もっと強度を上げる技術を開発すれば、プラスチックに代わる構造材料になり得ると考えられる。ほかにも、レジ袋やファストフード店で使用されているプラスチックのコップ/スプーン/ナイフなどは、すべて紙に変更することができる品々である。紙の高度利用は、今後の重要な技術開発分野になると思われる。

・天然物からの化学品開発

化学合成原料を資源循環型原料に変換するためには、石油化学から天然物である糖、アミノ酸、核酸、脂肪酸などを原料とする化学へ転換しなければならない。これらを原料とした場合、芳香族化合物が得られず、

色材やある種の医薬品、溶剤などに支障を来すことが考えられる。天然物原料を利用して芳香族化合物を合成する技術、もしくは芳香族化合物なしに色材や医薬品を製造する技術などの開発が望まれる。色材に関しては、天然色素の利用を再検討することも大切であろう。

・医薬/生理活性物質の開発

生物は、自ら生きていくためにさまざまな物質を合成している。それらの物質の中には、人間にも役立つものも数多い。したがって、生物をそれら有用物質の生産装置として利用することも有効である。特に物質循環を考えた場合、化学合成品よりも生物分解性に優れた生産物が多いと考えられ、その意味でも本方法の意義は深い。

最初の抗生物質ペニシリンが青カビから開発されたように、生理活性物質は(微)生物によって生産される有用物質の代表格である。

新規な生理活性物質を微生物から探索する場合、微生物そのものも新規なものであるほうが、発見の確率が高くなるであろう。そのような観点から、海洋特に深海の微生物が注目される。深海は、高圧、低温、場所によっては高温など、たいへん特殊な極限環境である。そのような極限環境には、地上にはいない、特殊な性質を有する微生物が棲息している。例えば、常圧では増殖せず、500気圧以上の圧力下で増殖を始める、絶対好圧菌がマリアナ海溝から見いだされている。深海微生物を使って、本格的に生理活性物質を探索した例はまだない。今後の研究が大いに期待される。

・産業用酵素の開発

酵素は家庭洗剤用、食品処理用、化学物質生産用などに広く利用されている。新規な有用酵素の探索においても、上記と同じ理由により、深海微生物が注目される。深海の熱水噴出孔周辺からは好熱菌が発見されているし、上述のように好圧菌も多く見いだされている。これらの微生物からは、耐熱性酵素や圧力によって活性が向上する酵素が見いだされている。酵素開発においても、深海微生物を利用したシステイマテックな研究が待たれる。

有用物質の生産性や活性を高めるための方法として、ゲノム解析が有効である。有用物質を生産する微生物のゲノムには、その物質の活性、生産量と生産速度(生産性)に関する情報がすべて含まれるはずである。したがって、ゲノム上の遺伝子を操作することにより、酵素や抗生物質の活性を高めたり、生産性を向上させたりすることができるはずである。(微)生物を物質生産装置として利用する場合、ゲノム情報を高度に利用することは最も重要な課題の一つであろう。

・新しい食糧の開発

現在、地球上で最も多く産出されている生物資源(バイオマス)はセルロースである。海洋においても、昆布類を初めとして、セルロース資源

コラム 11.3 人類には先見性がないのか？

本章の最初に述べたように、現在人類は地球環境問題やエネルギー問題に直面している。しかし、例えば、地球温暖化(CO₂ 排出)問題の最大の原因になっている自動車は、カール・ベンツによって 1885 年に発明されてからでも 150 年足らず、ヘンリー・フォードによって T 型フォードが 1908 年に大衆車化されてからであれば 100 年あまりしか経っていない。初めての合成繊維であるナイロンがデュポン社のカロザースによって発明(1935 年)されてからわずか 85 年で、合成高分子(プラスチック)は厄介ものになってしまった。1957 年にソ連によってスプートニク 1 号が打ち上げられてからわずか 65 年で宇宙ゴミ問題が発生している。エネルギー問題にしても、石炭が本格的に使われるようになってから 250 年程度である。このように見てくると、地球環境・エネルギー問題とは、人類の歴史におけるごく最近の出来事であることが理解できる。上記の技術や発明は、いずれも、出現した当時はバラ色の未来を約束した希望の星

であったはずである。それが、人類の歴史からすればきわめて短い期間のうちに人類全体の厄介者になってしまった。いったい何が問題なのであるうか。

人類には先見性がないのであろうか？ 人類史 20 万年からすれば短い、たった 100 年先のことが想像できないのであろうか？ 事実、想像できなかったがゆえに人類全体に関わる問題が発生したのである。人間以外の動物にも、もちろん先見性はないものと思われる。しかし彼らは、本能に従って生きており、種全体に関わるような問題を抱えてはいない。本能には、個の生存と種の保存を保証する行動が組み込まれており、これが先見性と同じ役割を担っていると考えられる。精神分析学者の岸田秀氏は、人類は本能を無くした動物であると主張している。もしそうなら、地球環境やエネルギー問題は、人類の本質に関わる根の深い問題だということになる。

は豊富である。このセルロースをグルコースに分解できれば、食糧になることは言うまでもない(図 11.6 参照)。イネやトウモロコシは、穀物部分だけではなく、茎や葉まで食糧になるということである。分解の方法としては、微生物分解、酵素分解、超臨界水分解などが考えられる。強力なセルラーゼの開発などが具体的なターゲットになろう。超臨界水分解については、すでに基礎的な研究はなされており、今後の進展が望まれる。グルコースをさらに加工して、食品としておいしく食べられるようにすることも、大切な技術開発であろう。

ケラチンは、毛、爪(蹄)、嘴、鱗などの硬い器官/組織を形成しており、ほとんど捨てられているものと思われる。しかし、ケラチンはタンパク質であり、タンパク質である以上、加水分解すればアミノ酸になる。つまり、食糧に変換できるわけである。ケラチン分解の技術が開発できれば、新しい食糧源が増えることになる。

微生物が生産するタンパク質の食糧化は、ずいぶん古くから考えられており、いわゆる石油タンパク質の名で検討されたことがある。そのときは、石油の中に含まれるベンゾピレンの発がん性が問題視され、実用化には至らなかった。しかしこの問題は、科学・技術上の問題であるよりは、感情的な世論による圧力が支配した問題であったと記憶している。誠に残念なことである。また石油タンパク質というネーミングも、食糧

として用いるには大いに問題があったと考えられる。

微生物の増殖の速さ、種類の多様さ、各種環境への適応の広さを考えた場合、微生物そのものを食糧/飼料として利用することは大いに検討すべき課題であろう。さらに、廃棄物を資化させて微生物を増殖すれば、廃棄物処理と食糧/飼料化が同時に行え、一石二鳥であろう。

昆虫食も、最近話題になることが多い。実際、イナゴの佃煮や蜂の子は、食されている。そのままの形ではあまり食べたいと思わないが、加工したり、タンパク質を取り出してから利用したりすれば、食糧としての可能性は高いと思われる。

11.4.2 二酸化炭素回帰パイプの増強策

化石燃料/資源の大量かつ短期間の使用によって、動物界から戻るCO₂が植物界で吸収し切れなくなったことが、地球環境・エネルギー問題の本質的な原因である。それならば、二酸化炭素回帰パイプ(図 11.2 参照)の増強は、最も重要な方策である。以下、その具体策を考えてみよう。

A. 動物(人間)界の排泄(廃棄)物を完全に自然に戻す

人間が発生する廃棄物を自然に回帰させるとは、分解してもう一度植物が利用できる化合物に戻すことにほかならない。現在の廃棄物処理法のうち、活性汚泥法と焼却法は概ねこの方向に合っている。プラスチックのような生物分解しない廃棄物を埋め立て処理する場合のみ、自然に回帰しない処理方法と言えよう。したがって、資源循環型社会の再構築のためには、埋め立て処理法は全廃し、活性汚泥法やコンポスト法を高度化し、環境に負荷の無い焼却法を開発する必要がある。また、プラスチックは紙などの生物分解性の天然物に変換することも重要である。

活性汚泥法の高度化としては、廃棄物処理の高速化、設備のコンパクト化、処理できる廃棄物(廃棄物スペクトル)の拡大などが目標になろう。好熱性微生物を利用した高温活性汚泥法などは、高速で分解できる活性汚泥法になりうると期待できる。この方法は、コストに見合うかどうかの問題になろう。また、メタン菌を利用した嫌気性活性汚泥法ができれば、メタンという有用な資源も得られる一石二鳥の方法である。活性汚泥法で開発された微生物の技術は、コンポスト法の改良にも有効であろうと考えられる。

B. 大気中の二酸化炭素をより多く吸収する

廃棄物をすべて二酸化炭素と水に戻した後は、この二酸化炭素をより多く吸収する太い回帰パイプが必要である。この問題は、11.4.1A 項で述べた太陽光のエネルギーをより多く生物生産に回す方法と合致する。なぜなら、光合成は必然的に二酸化炭素を消費するからである。よって、先に述べた砂漠の緑化や海洋農場の開発がその方策となる(図 11.8)。砂漠の緑化に関しては、先に述べた砂漠に水を引く方法以外にも、乾燥



図 11.8 二酸化炭素の回帰パイプ増強策の例

に強い植物の開発(品種改良)も有力な方法となろう。人工降雨技術も、もし可能ならば、もちろん有力な方法である。以下に、これらの方法以外の方策について記すことにする^{*3}。

^{*3} 二酸化炭素を地中に埋め込む技術「二酸化炭素貯留(carbon dioxide capture and storage, CCS)」も各所で検討されているが、ここでは触れない。物質(資源)循環型社会の構築には合わないからである。

・人工干潟などの構築

貝殻の主成分は、炭酸カルシウムである。つまり、干潟で貝が増殖すれば二酸化炭素の減少につながる。貝の増殖は、当然、食糧問題にも貢献する。同様の意味で、人工海浜、人工藻場、人工マングローブの構築も有効である。藻場やマングローブは、植物による二酸化炭素の吸収と同時に、動物たちの餌や棲家としての役割も担い、これまた一石二鳥である。

人工干潟は、すでに日本の各地で作られている。東京の葛西海浜公園もその一つである。瀬戸内海の各地にも、多くの人工干潟がある。これらの干潟は、主に海浜公園などの水に親しむ空間、漁場・潮干狩り場、野鳥公園などの整備、埋立てにより消失する干潟の代償措置といった目的で行われている。決して二酸化炭素の回帰パイプを太くするという目的で行われているわけではないが、結果的にはその役に立っている。さらに、二酸化炭素の吸収を目的として設計すれば、より有効な人工干潟ができる可能性がある。高度経済成長期において、多くの天然の干潟が工業用地などとして埋め立てられた。今後は、それらを復活するだけでなく、資源循環型社会の再構築の目的に合致した人工干潟を作っていく時代にしていくべきであろう(図 11.8 参照)。

・サンゴ礁の保全と育成

サンゴ礁を作る造礁サンゴ(イシサンゴ)の骨格の主成分も、炭酸カル

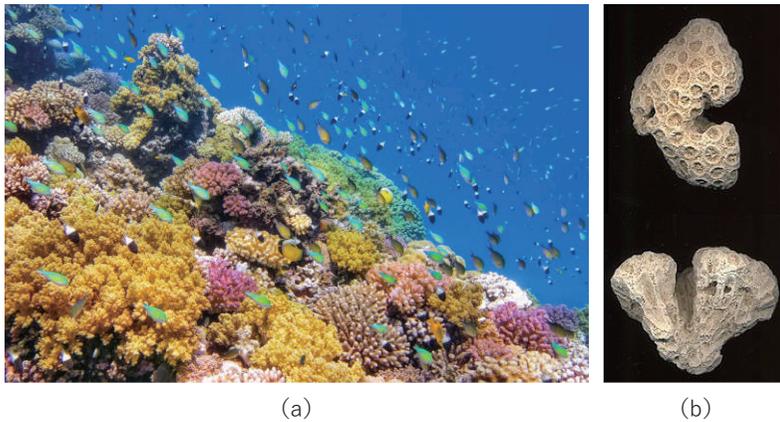


図 11.9 サンゴ礁(a)と造礁サンゴの骨格(b)

シウムである(図 11.9 参照)。したがって、サンゴも二酸化炭素の固定化(固体にして取り除くこと)に寄与している。サンゴ礁は、その中で多くの生命を育み、生物多様性の点からの重要性がよく論じられる。しかし、二酸化炭素の回帰パイプとしても重要な働きをしているのである。

現在、サンゴ礁は、地球温暖化など環境変化の影響を受けて急速に衰退している。世界資源研究所の 2011 年の調査報告によれば、世界のサンゴ礁の 75% が危機的な状況にあるとのことである。サンゴ礁の保全には多くの人達が関わっているが、問題が地球環境そのものにあるため、解決は容易には見つからないのが現状である。地球環境を正常に戻すために重要な二酸化炭素の回帰パイプが、地球環境に左右されるという複雑な問題に行き当たっている。

・CO₂固定化微生物の利用技術の開発

シアノバクテリア(ラン藻)は、植物と同じ光合成を行う。つまり、二酸化炭素をグルコースに変換してくれるのである。畑で穀物を栽培するように、海でグルコースを生産する海洋農場を作れる可能性がある(図 11.8 参照)。実際に錠剤にして、健康食品として流通しているものもある。河川に生育するアシツキもラン藻の一種であり、日本で古くから食用とされ、万葉集にアシツキを採取する女性を詠んだ歌がある。スイゼンジノリは、九州の湧水でのみ採れるラン藻であり、懐石料理の高級食材などに利用されている。このように、ラン藻はすでに食糧として利用されているが、まだまだ特殊な食品として扱われているにすぎない。ラン藻そのものを食品とするとともに、グルコースを抽出して別の食品に加工する技術も開発できれば、新たな利用も可能となろう。二酸化炭素の回帰パイプとしての機能も目的として、海洋農場におけるラン藻の栽培が期待される。

なお、ラン藻は、地球上で初めて光合成を行い、酸素を供給した微生物である。また、陸上の植物の葉緑体は、細胞内共生によって取り込ま

れたラン藻に由来すると考えられており、ラン藻は植物の起源を考えると重要な存在である。

まだ実用化には至っていないが、研究段階としてはいろいろな利用技術が検討されている。微生物によって、CO₂ から化成品原料であるエチレンを生産する技術、水素と CO₂ からグルコースを生産する微生物である水素細菌やメタン生成菌の研究などがある。微生物による二酸化炭素の固定化技術は、今後もいろいろな領域で発展していくものと期待される。

11.4.3 バイパスパイプも利用する

地球上におけるエネルギーの流れ；太陽光 → 化学エネルギー（グルコース）→ 熱エネルギー → 輻射熱と、物質循環；二酸化炭素 + 水 → グルコース → タンパク質などの生体物質 → 二酸化炭素 + 水のパイプが基本であるが、化石燃料/資源の使用を抑制するために、この基本の循環パイプを外れたバイパスパイプを利用することもできる。太陽光のエネルギーを、植物の光合成に依存せずに直接動物（人間）界で利用するパイプ、および廃棄物を二酸化炭素と水に最終処理する前に、再使用可能な段階で、バイパスとして供給資源に回すパイプである。本項では、この問題について述べよう。

A. 太陽光エネルギーの直接利用

太陽光パネルによる発電は、最も直接的な太陽光の利用である。現在の太陽光パネルのエネルギー変換効率は 15～20% 程度に達しており、かなり性能は上がってきている（第 10 章 10.3.1 項参照）。砂漠にこの太陽光パネルを 600 km × 600 km の面積くらい敷けば、全世界の現在の必要エネルギーはすべて賄える計算になる（演習問題 11.1 参照）。600 km と言えば東京—大阪間程度の距離で、世界地図で見ればほんの小さな面積である。ではなぜこれが実現できないのか？ 送電の問題があるためである。生産した電気を世界中に送る途中で、ジュール熱でほとんどをロスしてしまうのである。室温で超伝導の電線が開発されれば別であるが、現時点では、太陽光パネルの利用は使用する場所でのローカルな発電が最適と言えるであろう。

お風呂のお湯を、屋根に上げた太陽熱温水器で沸かすのも、太陽光エネルギーの直接利用である。夏の好天の日などでは、そのままでは入浴できないくらいの高温になる。シンプルではあるが、なかなか効率のよい利用法である。

風力発電、水力発電、波力発電も、本質的には太陽光エネルギーを利用していることになる。風の発生、海水の陸上への運搬（降雨）、風による海の波の発生は、すべて太陽光エネルギーが原因で起こる現象であるから。ちなみに、地熱発電は地球内部のマグマの熱エネルギー、潮力発電は太陽と月の重力エネルギーを利用しているので、太陽光エネルギーを利用しているわけではない。

B. 資源のリサイクル利用

廃棄物を二酸化炭素と水にまで戻さず、再利用(リサイクル: recycle)するバイパスである。単純に考えれば、資源を循環して使うわけであるから、たいへん良い方法であると思われる。しかし実際には、回収→使用可能な資源の選別→再使用のための洗浄・処理などに手間と経費がかかり、新たに製品を製造したほうが得策である場合が多い。本項では、現在実際にリサイクルされている例をあげてみよう。

・家庭ゴミのリサイクル利用

家庭ゴミのうち、紙、プラスチック、PET ボトル、缶、瓶などは資源ゴミとして分別収集されている。これらの中で、そのままの形で再利用(reuse)されているのは瓶くらいであろう。牛乳瓶、ビール瓶、酒瓶などである。これらの瓶も、最近では、缶や紙パックに置き換えられていることをご承知の通りである。

瓶の再利用においては、いったん砕いてカレットと呼ばれる粉体にし、再び熔融して瓶に成形するリサイクル法が主である。日本における瓶のリサイクル率(reuseを含む)は約70%で、かなり高い割合で再利用されている。空き缶のリサイクル率も高い。スチール缶は80%以上、アルミ缶に至っては90%程度まで再利用されている。

紙のリサイクル率も高く約65%である。自治体、古紙回収業者、新聞社などの努力と、各家庭における分別の賜物である。プラスチックの中では、PETがリサイクルされている。一度熔融してボトルに再生したり、繊維やシート(トレイ、パックなど)にして再利用したりしている。他のプラスチックゴミは、各種のプラスチックが混ざっているので、再生は困難と思われる。焼却処分になっている場合が多い*4。

・自動車のリサイクル利用

廃車になった車は、部品として再利用可能なものはそのまま使われる。また、ボディなどの金属部分(主に鉄とアルミニウム)は、ほぼ完全にリサイクルされている。自動車のスクラップは量も多く、金属のリサイクルとして重要である。自動車全体としては、その重量の80%程度がリサイクルされているようである。残りの20%も、2005年1月から本格施行された「使用済自動車の再資源化等に関する法律」(通称:自動車リサイクル法)にともない、エアバッグ類、フロン類もリサイクルされるようになった。現在では、リサイクル率は重量ベースで99%を達成していると言われている。行政、産業界、消費者が一体となった取り組みの賜物である。

・都市鉱山

パソコン、携帯電話、スマホなどには、各種のレアメタル(希少金属)が使われている。例えば、廃棄された携帯電話1トンからは、300gの金が回収可能である。この量は、天然金鉱石中の含有量の30倍にも相

*4 一方で、家庭ゴミには水分の多い生ゴミが含まれるために燃焼しづらく、重油などの燃料を加えて燃焼させている場合も多いようである。プラスチックは石油から作られるため、燃えやすい。

当する。金よりも高価な白金については、60 トンの廃棄物から 300 g 回収可能である。つまり、パソコンやスマホの廃棄物は、重要なレアメタルの原料である。「都市鉱山」と言われる理由はここにある。

他のレアメタルについて言えば、液晶パネル材料として重要なインジウムは、現在の世界の埋蔵量の 61% に相当する量が日本の「都市鉱山」に埋蔵されているという。推測されている日本の「都市鉱山」中の蓄積量としては、金：約 16%，銀：22%，スズ：11%，タンタル：10% などと報告されている。日本は、潜在的な「都市鉱山型資源大国」と言えよう。これらの都市鉱山の資源から、レアメタルを高品質で効率的に回収する技術を開発することは、今後の重要な課題であろう。

・サーマルリサイクル

以上では、各種廃棄物のリサイクル利用の実例をあげてきた。しかし、どうしても再利用できない廃棄物も当然出てくる。これらの廃棄物を焼却処分したときに発生する熱量を回収して利用しようとするのが、サーマルリサイクルである。自治体などがゴミ焼却場のそばに温水プールを建て、ゴミの焼却熱を使って温水を供給する場合などがこれに当たる。発電や施設の暖房などに使われている場合もある。

サーマルリサイクルはリサイクルという言葉が使われているものの、廃棄物を二酸化炭素に戻してしまう方法であり、再利用することによってバイパスを作るというリサイクルの語にはなじまない。むしろ、**図 11.2** の二酸化炭素の回帰パイプの一種とみなすべきであろう。

ここまで各種のリサイクルの現状を見てきたが、その結果わかることは、リサイクルできるものをリサイクルしているだけだということである。それはある意味では当然のことで、いったん廃棄物として拡散したものを元に戻すことは、本来エネルギーが必要である。エントロピーを減少させるためには、外部からエネルギーを供給する必要があるということである。物質循環の王道は、やはり本流である循環パイプを太くすることにあると銘じるべきである。バイパスはあくまでバイパスなので、そちらに過度の期待をしてはいけない。

コラム 11.4 太陽光のエネルギーに依存しない特殊な生態系

11.1 節と 11.2 節で述べたように、地球上のすべての生物は太陽光のエネルギーに依存して生存している。しかし地球上には、全生物量からすればごく少量ではあるが、太陽光に依存しない特殊な生態系が存在する。深海の熱水噴出孔周辺の生態系である(図)。水深 200 m 程度より深い深海は、太陽光が届かない世界である。したがって、太陽光を利用した光合成はできず、植物の合成するグルコースを利用することができない。しかしながら、海嶺や海底火山の周囲にある熱水噴出孔では、300℃ 以上もの熱水が噴き出しており、その周囲

には熱水中に含まれる硫化水素や水素をエネルギー源にして生存する化学合成細菌や古細菌が繁殖している。つまり、太陽光の代わりに化学エネルギーを利用して有機物を合成する微生物が生存しているのである。微生物が存在すれば、それを食物とする高等生物も現れる。実際、オハラエビ、イソギンチャク、シンカイコシオリエビ、ユノハナガニ、ゲングなどが高密度で生息している。また、化学合成細菌を体内に共生させて、それらからの生産物を利用するチューブワーム(ハオリムシ)やシロウリガイなども生息する。深海における、地下からの化学物質のエネルギーに依存する生態系を化学合成生態系と呼んでいる。

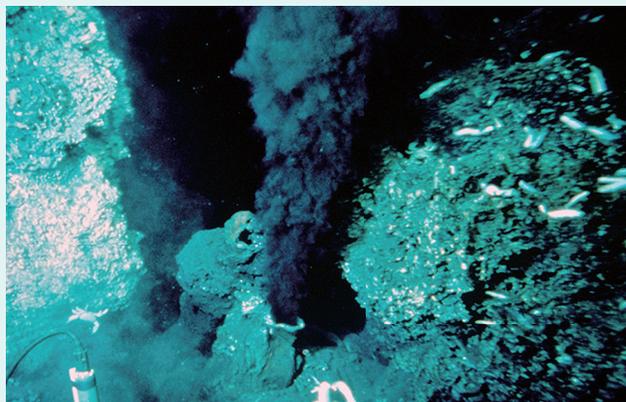


図 深海における熱水噴出孔とその周囲の化学合成生態系

演習問題

- 11.1** 現在、人類が 1 年間で使用する全エネルギーは、約 5×10^{20} J である。このエネルギー量を、すべて砂漠に敷いた太陽光パネルで賄うとすると、何 km × 何 km の面積が必要になるか計算しなさい。計算には、次の数値を利用しなさい。
- ・ 砂漠に降り注ぐ太陽光エネルギー： $4.0 \text{ J min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
 - ・ 砂漠に太陽が照る平均時間： 500 min day^{-1}
 - ・ 太陽光パネルのエネルギー変換効率： 20%
- 11.2** 化石燃料/資源に頼らない資源循環型社会の再構築に関して、自分の専門(興味)を生かしてやってみたい課題(夢)をあげ、その具体的解決策について述べなさい。
- 11.3** 深海の熱水噴出孔近辺の高温・高圧の水は、通常の水とはたいへん性質が異なっている。例えば、セルロースやキッチンが溶けたり、無機塩の溶解度がたいへん小さくなったりする。高温・高圧の水、すなわち超臨界水や亜臨界水の特徴について調査し、その面白さと利用について考察してみなさい。

解答

- 11.1** 砂漠に降り注ぐ太陽光から得られる 1 年間のエネルギー量は、 $4.0 \times 500 \times 365 \times 0.2 \text{ J cm}^{-2} = 1.46 \times 10^5 \text{ J cm}^{-2}$ である。したがって、人類が必要とするエネルギー量を得るためには、 $5 \times 10^{20} \text{ J} / (1.46 \times 10^5 \text{ J cm}^{-2}) = 3.42 \times 10^{15} \text{ cm}^2 = 3.42 \times 10^5 \text{ km}^2$ の面積が必要である。この面積は、約 $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$ で得られる。600 km とは、東京-大阪間の距離程度であり、地球の規模からすればわずかな距離である。

蛇足ながら、地球の表面積は $4\pi r^2$ (r は地球の半径) $= 4 \times 3.14 \times (6378 \text{ km})^2 \approx 5.11 \times 10^8 \text{ km}^2$ である。したがって、先の太陽光パネルを敷き詰める面積は、地球の表面積の 0.067% に相当する。

- 11.2・11.3** 読者の皆さんご自身で検討いただきたい。