

村上ゼミシリーズ II

エネルギー問題を斬る

地球の将来はエネルギー問題が命運を握っている
みんなで真剣に考えてみよう

村上 雅人
小林 忍

飛翔舎

はじめに

いま、**エネルギー危機** (energy crisis) が叫ばれています。ロシアのウクライナ侵攻をきっかけに、**再生可能エネルギー** (renewable energy) の導入を喧伝してきたヨーロッパ諸国が、実は、**化石燃料** (fossil fuel) であるロシアの**天然ガス** (natural gas) に大きく依存していることが分かりました。

人類が生きていくためには、**エネルギー** (energy) が必要です。寒い時に暖をとるのにも、暑い日に冷房を入れるのにも、そして、自動車や電車やコンピュータを動かすのにもエネルギーが必要です。経済活動を含めたすべての分野で、エネルギーは必要となるのです。このため、エネルギーをいかに確保するかが国家戦略となっています。

それでは、そもそもエネルギーとはいったい何なのでしょう。か？こう聞かれたとき、どれだけのひとが答えられるでしょう。本書では、原点に戻って、エネルギーの定義から始め、その本質を説明します。なにごとにも、基本を理解していなければ、つぎのステップには進めないからです。

「エネルギー問題を斬る」は、三回のゼミからなっています。初回ゼミでは、復習もかねて、エネルギーの基礎を学びます。さらに、人類が現在利用しているエネルギー源である**水力発電** (hydropower generation)、**火力発電** (thermal power generation)、原子

力発電 (nuclear power generation) についても現状と課題をまとめています。

二回目のゼミでは、世界中から注目を集めている**再生可能エネルギー** (renewable energy) とは何かを紹介します。中でも、**太陽光発電** (photovoltaic ; solar power generation) や**風力発電** (wind power generation) が注目を集めていますが、大きな課題もあります。太陽電池が作動する原理などを紹介し、それを理解、整理したうえで、世界が持続発展するための方策を提案します。

三回目のゼミでは、クリーンエネルギーとして注目されている**電池** (battery; cell) の原理や、その課題について徹底的に検証します。いま、欧米や中国では、急速にガソリン車から**電気自動車** (EV: electric vehicle) へとシフトしています。EV は CO₂ を含む排気ガスをいっさい出さないからです。しかし、電気自動車は、いわばガソリンが空のガソリン車です。エネルギー源の電気を供給しなければ動きません。ただでさえ逼迫している電気エネルギーをさらに大量に消費するのです。一方、運転時に排気ガスゼロであっても、肝心の電気をつくるときには CO₂ を排出します。この事実を忘れてはいけません。

エネルギー問題は世界の課題です。しかし、それを論じる際には、基礎をしっかり理解していることも大切です。本書では、指導教員とゼミ生が議論を交わしながら、エネルギー問題の本質に迫っていきます。

2022 年 9 月

村上雅人 小林忍

もくじ

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

第一回ゼミ エネルギーとは・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

- 1. 1. 仕事とエネルギー 11
- 1. 2. 運動エネルギーと位置エネルギー 18
- 1. 3. 気体の状態方程式 20
- 1. 4. 熱エネルギー 26
- 1. 5. 熱源 28
- 1. 6. 化石燃料 31
 - 1. 6. 1. 石油 31
 - 1. 6. 2. 天然ガス 36
- 1. 7. 1 次エネルギーと 2 次エネルギー 38
- 1. 8. 電気エネルギー 44
- 1. 9. 電力 (ワット) とは 47
- 1. 10. 電磁誘導 52
- 1. 11. 発電手法 56
- 1. 12. 発電所 58
- 1. 13. 原子力発電 60
- 1. 14. 連鎖反応 65
- 1. 15. 中性子 68
- 1. 16. 放射能 71
- 1. 17. 中性子による放射化 78
- 1. 18. 石炭火力 82
- 第一回ゼミ補講 電気による力 88

A1.1. 基本はローレンツ力 89

A1.2. 電流に働く力 94

A1.3. モーターが動く原理 97

A1.4. 発電機の原理 100

A1.5. 電動機器の効率 103

学生自主ゼミ 1 106

自主ゼミ 1 「エネルギーとは」のまとめ 114

第二回ゼミ 再生可能エネルギー・・・・・・・・・・117

2.1. 水力発電 120

2.2. 揚水発電 125

2.3. マイクロ水力発電 129

2.4. 風力発電 134

2.5. 風力発電の出力 140

2.6. 洋上風力発電 143

2.7. 地熱発電 146

2.8. バイオマス発電 152

2.9. カーボンニュートラル 157

2.10. 炭素固定 161

2.11. バイオ燃料 165

2.12. 太陽光の応用 167

第二回ゼミ補講 エネルギーと効率 173

A2.1. エネルギー保存の法則 173

A2.2. 使えるエネルギーと使えないエネルギー 175

A2.3. 熱力学 177

A2.4. 熱と気体 180

A2.5. 運動の自由度 185

もくじ

A2. 6. 熱機関の効率 193

学生自主ゼミ 2 200

自主ゼミ 2「再生可能エネルギー」のまとめ 206

第三回ゼミ 電池 208

- 3. 1. ボルタ電池 210
 - 3. 2. イオン化傾向 213
 - 3. 3. ダニエル電池 222
 - 3. 4. 乾電池 226
 - 3. 5. アルカリ乾電池——電解液がアルカリ性 232
 - 3. 6. ボタン電池 235
 - 3. 7. 2 次電池——充電可能な電池 240
 - 3. 8. リチウムイオン 2 次電池 250
 - 3. 9. 太陽光発電——再生可能エネルギー 262
 - 3. 10. ダイオード 266
 - 3. 11. 正孔の移動 269
 - 3. 12. 太陽電池 273
 - 3. 13. 燃料電池 284
 - 3. 14. 電力貯蔵 293
 - 3. 14. 1. ナトリウム硫黄電池 296
 - 3. 14. 2. レドックスフロー電池 299
 - 3. 14. 3. その他の電力貯蔵装置 302
 - 3. 15. 固体電池 304
 - 3. 16. 環境汚染 308
- 学生自主ゼミ 3 312
- 自主ゼミ 3「電池」のまとめ 318

ゼミ指導教員のコメント・・・・・・・・・・ 322

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 327

第二回ゼミ 再生可能エネルギー

雅人 それでは、今日のゼミでは、いま世の中の大きな注目を集めている**再生可能エネルギー** (renewable energy) について取り上げたいと思う。

和昌 再生可能というのは、エネルギーを使っても再生されるという意味なのでしょうか。

雅人 再生という用語は正しくはないんだ。資源が枯渇しないという意味だ。前回のゼミで1次エネルギーについて取り上げたね。

しのぶ その中で、石油、石炭、天然ガスやウランは資源が限られているので、大切に使う必要があると言われていました。

雅人 従来のエネルギーは、いずれ資源が枯渇してしまう。再生可能エネルギーは、これらのエネルギー源と異なり、枯渇しないエネルギーという意味になる。

莉緒 それは、将来のエネルギー源として、とても有望ではないでしょうか。たとえば、どういうものがありますか。

雅人 太陽光や水力、風力などがこれに相当する。

しのぶ 確かに、これらのエネルギー源は地球が存続する限り枯渇することはありませんね。

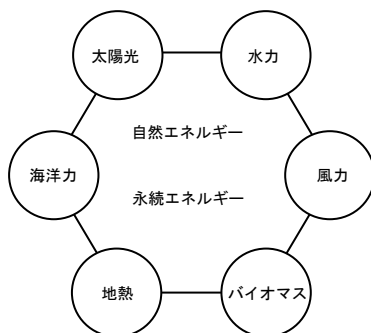


図 2-1 再生可能エネルギー：自然界に存在し、永続的に利用できるエネルギー。

直道 ところで、地熱発電 (geothermal power generation) はどうでしたでしょうか。温泉地の地下にある熱水を利用して発電すると聞きました。

雅人 実は、地熱発電も再生可能エネルギーに分類されている。これは、地球内部の熱、つまり地熱が枯渇しないという考えに基づいている。

和昌 とすると、地球内部の温度が下がれば再生可能エネルギー

第二回ゼミ 再生可能エネルギー

ではなくなるのですね。前回のゼミで、地球の中心温度が 6000℃ に保たれていることが不思議だという話を聞きました。それでも、いずれ、地球は冷えるのではないのでしょうか。

雅人 もし、そうなら再生可能エネルギーではなくなるね。ただし、それは何 10 億年も先の話だと思う。だから、実質的には枯渇しないと考えていいんだ。

しのぶ 他にも再生可能エネルギーはあるのでしょうか。

雅人 海の潮汐や波の力を利用するものもある。また、**バイオマス (biomass)** を利用した発電も再生可能エネルギーに分類されている。

直道 バイオマスという用語は聞いたことがありますが、意味はなんだったのでしょうか。バイオとあるから生物に関係があるかと思いますが。

雅人 バイオマスというのは、生物由来の資源だが、バイオマス発電の対象になる燃料は、いままで捨てていた廃材などを有効利用しようとするものだ。

莉緒 それであれば、資源は無尽蔵ではないと思います。それでも、再生可能エネルギーなののでしょうか。

雅人 植物や動物は、つぎからつぎへと誕生し成長している。だから、地球がある限り、その資源は枯渇しないという意味なんだ。

しのぶ なるほど。

雅人 再生可能エネルギーは資源に限りある化石燃料が枯渇しても使える。だから、有望なエネルギー源と考えられている。

莉緒 なにか課題はないのでしょうか。

雅人 もちろんあるよ。太陽光も風力も水力も永続的な資源だが、そこからエネルギーを取り出すためには、それなりの設備が必要になる。また、場所も必要だ。設備をつくるためには、コストもかかるし、材料も必要になる。これらの設備は永遠ではないんだ。そのことを忘れてはいけない。

和昌 たしかに、水力発電用のダムもいずれ使えなくなると聞いたことがありますし、海外では大雨でダムが崩壊したこともありましたね。

雅人 ただし、水力そのものは永続的に使えるエネルギー源であることに変わりはない。だから知恵を出して、いかにこれらのエネルギーを有効利用していくかが人類にとって重要課題となる。

直道 まさに、環境にやさしいエネルギーなのですね。

2.1. 水力発電

雅人 それでは、再生可能エネルギーの代表である水力発電について考えてみよう。

莉緒 水力発電は、太陽の恵みで水が上空まで登り、そして山々に降った雨が川となって流れるのを堰き止めてダムをつくっているのですから、確かに、エネルギー源は常に補充されていますね。

雅人 その通り。まさに、環境にやさしいエネルギーと言える。さらに、すでに紹介したように、ダムに溜まった水の位置エネルギー (mgh) を貯蔵しており、発電は、この位置エネルギーが水が落下する際の運動エネルギー ($(1/2)mv^2$) に変換してタービンを廻し発電している。つまり、力学的エネルギーの変換なので無駄がない。

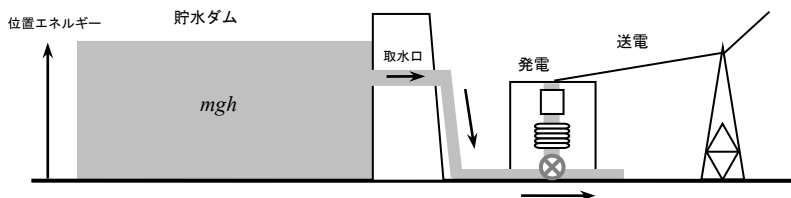


図 2-2 水力発電：ダムに貯めた水の位置エネルギー (mgh) を運動エネルギー ($(1/2)mv^2$) に変換して磁石コイルを回転させて発電している。

和昌 なるほど。それでは、エネルギー変換効率は 100% なのでしょうか。

雅人 いや、実際にはタービンの回転時の摩擦など、効率を下げる要素はいろいろあるから、トータルでは 80% 程度とされている。

る。

莉緒 それは、すごい効率ですね。さらに、二酸化炭素 CO₂ もいっさい発生しないのですから地球環境にやさしい究極のエネルギーです。まさに、理想ではないでしょうか。

しのぶ さらに火力発電と違って燃料費もいっさい必要ないですね。もともと自然にある太陽の恵みと水の位置エネルギーが源ですから。

雅人 そうなんだ。水力発電はとても優れた発電技術と思うよ。ところが、日本では全発電量に占める水力発電の割合は 8% 程度でしかないんだ。

直道 それはおかしいですね。低炭素社会を目指すならば、その比率をもっと高めることが政府として進めるべき施策ではないですか。

雅人 そうだね。日本には河川がたくさんある。それに降水量も多い。だから、水力発電にとっては、格好の立地でもある。1997 年に京都議定書 (Kyoto protocol) が締結されたので、わたしも当然、水力発電の開発が進むものと思っていたのだが、そうはならなかった。

莉緒 どんな理由でしょうか。

雅人 ひとつは、原子力発電の建設が進められていたことかな。

日本は原子力発電技術を海外に輸出することにも当時は積極的だった。さらに、前回のゼミでも一緒に計算したように、 ^{235}U たった 1.5[g] で $50 \times 100 \times 100 \text{ [m}^3\text{]}$ というダムと同じエネルギーを発生できる。夢のようなエネルギーなんだ。

直道 水力発電ではエネルギー密度が高くないということですか。そういえば、このダムに溜まったエネルギー量は、天然ガス CH_4 ならば 2205 [kg] に相当するのでしたね。同じエネルギーに対応した水の重量は $3.3 \times 10^8 \text{ [kg]}$ ですから、その差は歴然ですね。

雅人 とは言っても、ウラン原料は有限だから、いずれ原子力発電も枯渇してしまう。さらに、水力発電では、燃料費がいつさい掛からないのだから、優れた自然エネルギーであることに変わりはないと思うよ。ただし、水力発電に関しては、もっと難しい問題があったんだ。それは、むしろ政治論争と言っても良い。当時は、公共事業に対する批判が世の中に強かったんだ。

しのぶ わたしは、「脱ダム宣言」という標語を聞いたことがあります。結構、カッコいい言葉だなと思っていました。

雅人 さきほども紹介したように、水力発電用のダムは巨大でないと、大きなエネルギーを確保できない。しかし、山間地に建設される巨大ダムは自然破壊につながる。しかも、ダムをつくるために村全体を移住させたこともある。

和昌 そういえば、自分たちの住む場所を奪われたと住民がテレビで抗議している場面を見ました。

雅人 さらに水力発電所は山間部につくられるから、送電コストもばかにならないし、その設備も必要だ。もともとダム建設には莫大なコストがかかり、利権の温床にもなる。

直道 なるほど、送電距離が長いとそれだけロスも発生しますね。その上、金もかかり、自然破壊とくれば、多くの国民が反対するのも納得できます。そのため、国としても水力発電を推進するのは難しいことだったのですね。

雅人 さらに、ダムには土砂が流れ込んでくる。これを取り除かないと、発電効率も下がる。しかし、この作業には、さらなるコストがかかるんだ。この点も指摘されていたね。

和昌 たしか、ダムに河川のような流れをつくって定期的に土砂を流すという方式があると聞きました。

雅人 そういう工夫もされているね。また、ダムには発電だけでなく治水 (flood control) という大きな役割もあるんだ。洪水を防ぐという役割も果たしている。それから、われわれの水道の水もダムから供給されている。

しのぶ 確かにそうですね。ときどき、春から夏にかけて、ダムの貯水率が問題になりますよね。

雅人 そういう意味では、ダムは貴重な存在なんだ。「コンクリートから人へ」予算をシフトと言われたら、反対できる人はいないだろう。それに、何か新しいことをしようとすれば反対は必ず

起こる。メリットとデメリットがあるからね。しかも、マスコミは徹底して、このデメリットだけを取り上げる。

しかし、政策というものはメリットとデメリットを天秤にかけて長期的視野に立って判断する必要があるものだ。

和昌 それでも、最近では各所で**洪水 (flood)** 被害により人的被害も発生しています。河川流域の住民からは、ダムのは治水という機能も再評価されているのではないのでしょうか。

2.2. 揚水発電

雅人 そういう意見も出されているね。ただし、ダムをつくるためには何十年という時間がかかる。多くの地域で、脱ダム宣言によってダム計画が中止されたが、それを復興しようとする、ものすごい年月がかかるんだ。

ただし、原子力発電が厳しい状況下では、水力発電の効用については、多いに見直すべきと思うよ。ところで、みんなは**揚水発電 (pumping-up hydraulic power generation)** という発電システムを聞いたことがあるかい。

直道 名前だけは聞いたことがあります。揚水とは水を汲み上げるという意味でしたね。

雅人 最初、そのアイデアを聞いたときは、とても驚いたんだが、いまでは有望な発電方式と思っている。これは、ダムと、それよりも低地にある調整池でできている。実は、電力消費量は、昼と夜では大きく異なるんだ。

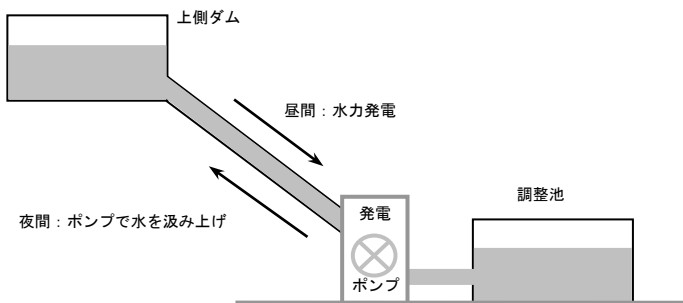


図 2-3 揚水発電：電力需要の大きい昼は、通常の水力発電として機能し、夜は余剰電力を利用して調整池の水を上方のダムにポンプで汲み上げて昼に備える。

莉緒 昼の消費量が夜よりも多いということですね。それは分かります。多くの活動は昼に行われますから。

雅人 それならば、夜の発電を抑制すればよいと考えるよね。ところが、原子力発電や火力発電では、簡単にオンオフができない。原子力も火力も燃料を燃やして、その熱で水蒸気を発生させタービンを廻して発電する。発電機器は、大型だから運転するまでに、かなりの時間を要するんだ。さらに、原子力では核分裂の連鎖反応を利用しているから、始動も停止にもかなりの時間が必要となる。

結果として、こまめにオンオフするよりも、これらの発電方式では、昼も夜も、常に電力をつくり続けているほうがコスト的にも安く、メンテナンスもしやすいんだ。結果、夜には、余剰電力 (surplus electricity power) が生じることになる。

直道 それであれば、夜の余剰電力を貯めておけばよいのではないのでしょうか。

雅人 確かに、そうなんだが、いまのところ、大きな電力を貯蔵できる有効な方法はないんだ。**2次電池** (second battery) を利用したり、**フライホイール** (flywheel) とよばれる回転機器にエネルギー貯蔵するという方式も検討されているが、巨大な発電所の電力となると、決定版がないのが現状だ。

そこで、揚水発電の登場だ。昼は普通の水力発電の方式で、発電する。ただし、発電に利用した水は河川に流さず、下方の調整池に水を貯めておく。そして、夜になったら余剰電力を使って、調整池の水をポンプで上のダムに戻す。つまり揚水する。そして昼になったら、ふたたび水力を利用して発電する。これが揚水発電の原理だ。

莉緒 すごい発想ですね。水を高所に持っていくという考えがすごいです。エネルギーそのものの節約にはなりませんが、昼と夜の電力の調整はできるのですね。

雅人 ああ、専門的には**負荷平準化** (load leveling) とよんでいる。

しのぶ この方式だと、水を循環させているので、雨が降らなくとも発電はできますね。

雅人 そうなんだ。水力発電では、雨が降らなければダムに水が貯まらないので発電できないという問題がある。揚水発電ではその心配がない。

和昌 とは言え、先生が指摘されたように、水をポンプで汲み上げるといことはなかなか思いつきません。それが役に立っているということは面白いです。

雅人 いずれ、水力発電は、簡単に電力発生のおんオフが可能という側面があり、火力発電では賄えない緊急時のバックアップに利用できるという利点もある。

直道 それでも、環境問題もあって、日本では、水力発電が推進できないということは残念ですね。

雅人 いまから、巨大なダムをつくろうとしても、住民の反対でつぶされるだろうね。環境破壊と指摘されたら、抗弁するのは難しい。ただし、火力や原子力と違って、水力発電は途上国でも簡単に始められる技術なので、世界的には、拡大していく発電技術と思うよ。

しのぶ そういえば、国をまたがる大きな河川に上流の国がダムをつくって大問題になっていますね。あれは、ひどいと思います。その結果、旱魃などの被害も発生しています。

直道 日本は自国で完結していますが、確かに、国家間にまたがる河川については相互理解が必要なので、とても難しい問題ですね。

雅人 水力や火力発電所と言うと、巨大なものほど良いという固定観念があるが、小型で分散型の電源としての普及も重要だと思

うよ。電力の安定供給という観点では、確かに巨大な発電所をつくって、供給量をコントロールという考えも分かるが、これからは、そのような時代ではないと思う。日本も原子力に頼りすぎて、いまでは大きなしっぺ返しにあっている。

しのぶ 先生の提案する分散型の小電源とは、田舎などで小さな川に設置している**水車 (waterwheel)** のような発電設備のことでしょうか。

2.3. マイクロ水力発電

雅人 まさに、そうだ。**マイクロ水力発電 (micro hydraulic power generation)** とよばれることもある。もともと人類は、昔から水車を利用して、精米や製粉などに利用してきた。小川があれば可能な技術だ。海外でもそうだね。それを発電に利用するのはいいアイデアだと思うよ。大型の工事もないしね。

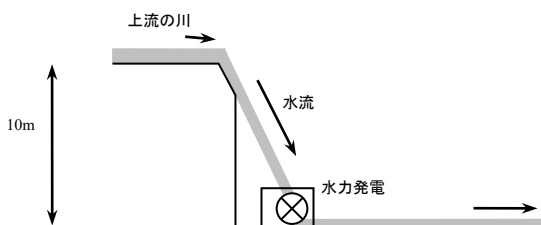


図 2-4 滝などの自然の高低差を利用した発電設備。この方式ではダムを建設する必要がないという利点がある。高低差が小さい小川に設置することもできる。

和昌 そういえば、自分の田舎の岩手でも滝を利用した小型の水
力発電所がありました。高低差もせいぜい 10[m] くらいで驚いた
ことがあります。

雅人 高低差が分かれば、落下したときの水の速度が分かるね。

しのぶ 計算してみます。高さ h にある物体が地面に到達すると
きの速さは、質量 m には関係なく

$$v = \sqrt{2gh}$$

でした。いまの場合は、 $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ 、 $h = 10 \text{ [m]}$ ですから

$$v = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} = \sqrt{196} = 14 \text{ [m/s]}$$

となります。

雅人 その通りだね。ここで水路の断面を $10 \text{ [m}^2\text{]}$ とすれば、1 秒
間に流出する水の量は何 kg だろうか。

莉緒 水の速さが 14 [m/s] ですから $140 \text{ [m}^3\text{/s]}$ となり、1 秒間に
 $140 \text{ [m}^3\text{]}$ の水量です。これを質量に換算すれば、水の密度を
 $1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ とすると 140000 [kg] となります。

雅人 そうだね。とすると、1 秒間の運動エネルギー $(1/2)mv^2$ は
どうなるかな。

直道 いま求めた数値を代入すればよいだけですな。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 140000 \times (14)^2 = 13720000 \text{ [J]}$$

となります。そうか、これは1秒間に得られる仕事だから

$$13720000 \text{ [J/s]} = 13720000 \text{ [W]}$$

となりますね。つまり電力は13720 [kW] です。

雅人 比較的小さな水力発電でも結構なエネルギーが得られることが分かるね。

和昌 田舎にある発電所程度の大きさであれば、環境破壊も問題にならないですし、手軽ですね¹。

雅人 何度も言っているように、エネルギー源は多様であるべきなんだ。水力も巨大なダムに頼るのではなく、小型のものでも有用だという認識が大切だね。

しのぶ 先生、ついでにマイクロ水力発電の電力も計算したいですね。

雅人 分かった。実際に計算してみよう。まず、平均的な川の流れの速さは1[m/s]程度とされている。ここで、マイクロ水車の断面の大きさを1[m]四方としてみよう。すると、1秒間に移動する水量はどうなるかな。

¹ もちろん、観光用の滝に設置する場合には、景観を損なうとして地域住民による反対運動はある。

莉緒 その場合、断面積 $1[\text{m}^2]$ の水が $1[\text{m/s}]$ で移動することになりますので、 $1[\text{m}^3/\text{s}]$ となります。 $1[\text{m}^3]$ の水の質量は $1000[\text{kg}]$ でしたから、 $1[\text{s}]$ 間に移動する水の質量は $1000[\text{kg}]$ となります。

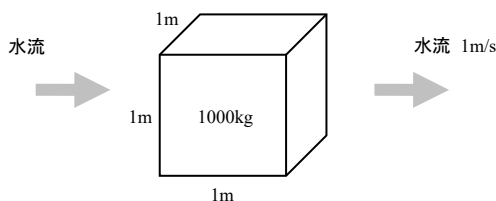


図2-5 川の流れが 1m/s の場合の $1 \times 1 \text{ m}^2$ の断面の水が 1 秒間に移動する量

和昌 これ以降の導出は分かります。移動速度が $1[\text{m/s}]$ でしたから

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 1000 \times 1^2 = 500 [\text{J}]$$

となります。これは $1[\text{s}]$ 間に得られる仕事だから、得られる電力は

$$500 [\text{J/s}] = 500 [\text{W}]$$

となります。

雅人 それほど大きくはないが、 $100[\text{W}]$ の電球を 5 個つけることのできる電力が得られることになる。しかも、川の流れが止まらない限り、 365 日、 24 時間出力が得られる。とすると、 1 日で $0.5[\text{kW}] \times 24[\text{h}] = 12[\text{kWh}]$ 、 1 年では $12 \times 365 = 4380[\text{kWh}]$ となる。これは、一般家庭の一年間の電力消費量 $5000[\text{kWh}]$ にほぼ

近い。

直道 なるほど、この程度の大きさのマイクロ水力発電で一家族の電力が賄えるのですね²。日本では、いたるところに川が流れていますので、電力を得る方法として、とても有望ですね。

莉緒 水力であれば、農業用水路などでも発電が可能ですね。さらに、CO₂ も発生しないのですから、とてもよい話に聞こえるのですが、なぜ普及していないのでしょうか。

雅人 それは、政府の規制があることも大きな理由なんだ。水というのは、もともと利権のかたまりだ。我田引水という言葉にもあるように、農業用水の奪い合いは壮絶だったと聞く。それが、いまだに残っていて、複数の省庁が多くの規制をかけてきた。2050 年に脱炭素を宣言するならば、そんな規制など取っ払って、マイクロ水力発電の普及に努めるべきだと思うよ。

直道 確かに小型であれば、環境問題もないし、設置も簡単ですよ。とても有望ではないでしょうか。

雅人 実は、高層ビル内にも水流はある。それを利用して発電しているところもある。簡単な装置で、水流さえあればどこでも設置できるから、自然河川だけでなく、水を利用している工場などでも導入可能と思う。ただし、地産地消が基本と思う。余った電

² 川に設置した水力発電は、24 時間発電し続けるために、昼夜の電力需要の差には対応できない。この場合、電池などの電力貯蔵装置との併用が必要となる。

力を送電網に戻そうなどするとシステムが複雑化するし、停電の危険性もある。これは、他の電源にも言えることなんだ。基幹の電力網は電力会社に任せて、身近なエネルギーは自分のためだけに使う。これをみんなが進めれば節電につながる。

莉緒 先生、世の中には**風車** (wind mill) もありますよね。**風力発電** (wind power generation) も有望なエネルギー源ではないでしょうか。

2.4. 風力発電

雅人 確かに風力発電も再生可能エネルギーの仲間だ。そして、風さえ吹いていればプロペラを廻して発電できる。まわりに河川がなくとも発電が可能という利点もある。

しのぶ 風力発電の原理は、風の力で風車を廻して、それが発電機の中の磁石を回転させているだけでしょうか。

雅人 その通りだ。水力も火力も原子力も磁石を回転させて発電している。それぞれ、回転力を得る機構は違っても、原理は一緒だ。風力発電も同じだね。

和昌 発電にはいろいろな種類がありますが、動力源が違うだけで、磁石の回転は共通なのですね。

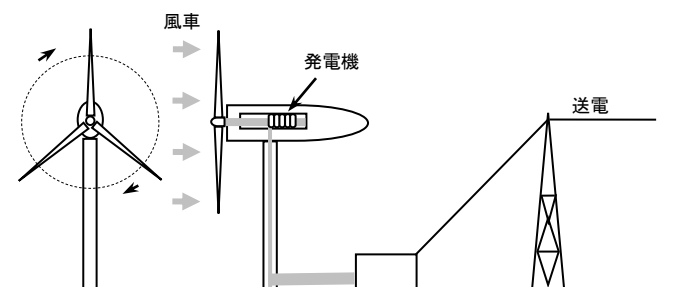


図 2-6 風力発電：風によって風車が回転し、発電機の磁石が回転することで発電している。

雅人 ところで、みんなは「北の国から」という名作ドラマを知っているかな。電気の通っていない富良野で、中学生の純が風力発電機をつくって、父の五郎を驚かせたことは有名だね。

しのぶ ごめんなさい。そのドラマは見たことがありません。

雅人 そうか、1987年の放送だから、みんなが生まれる前のテレビドラマだね。だから知らないひとも多いんだね。

莉緒 母から番組名は聞いたことがあります。作家が有名な倉本聡さんですよ。ロケ地が富良野で、観光地として有名になったきっかけと聞きました。わたしは行ったことがありませんが、丸太小屋の屋根に純がつくった風力発電用の4つの羽根車があると聞きました。

雅人 もちろん、「北の国から」の風力発電はフィクションだが、実際にアフリカで、その導入に成功した 14 歳の少年が居るんだ。カムクワンダというアフリカの馬拉ウイ共和国の住人だ。この国では、電力がほとんどなかったのので、廃品などを活用して自力でつくり上げたい。

和昌 それはすごいですね。規模の小さな風力発電ならば、素人でも製作が可能なのですね。

雅人 もちろん電気の知識は必要だが、独学で学べる。風を受けて回転するプロペラは飛行機などで、すでに開発されている。後は、その回転力をうまく磁石の回転に適用すれば、発電できることになる。扇風機も基本的には同じ構造だね。

しのぶ なるほど、それならば、分散型電源として有望なのでしょうか。

雅人 そう思うが、川の水の流れは途切れることはないが、風は気まぐれだからね。365 日 24 時間発電というわけにはいかない。

直道 日本では風力を使うまでもなく、河川が豊富なので水車のほうが広まったのではないのでしょうか。

しのぶ さらに、日本では毎年のように台風が上陸するので、風車が破壊されるおそれもあります。

雅人 確かに、危機管理は大切だね。まず、昔の日本では風車を

水車と同じように応用することは想定されていなかったことになる。さらに、風車（ふうしゃ）が利用されているヨーロッパでは安定に風が吹くうえ、台風が来ないからね。

実は、日本でも明治時代に風車が導入されたことがある。海外技術者が持ち込んだとされているが、それほど普及はしなかったんだ。やはり、台風の問題があるからかな。せっかくつくっても台風で破壊されたら一瞬で終わりだからね。

莉緒 とは言え、風力発電はいまや再生可能エネルギーの救世主として、日本政府も、その導入に積極的ですよ。

雅人 そうなんだ。その背景にはドイツでの成功がある。ドイツでは、総発電電力量のなんと 20% が風力発電となっている。日本では 1% にも達していない。

直道 日本では、普及していないんですね。逆にドイツでは、なぜこれだけ普及しているのでしょうか。

雅人 もちろん、良い風が吹くということが大きいと思うよ。風力発電では、風は弱すぎても、強すぎても難しいからね。みんなは、台風の報道などで、たとえば風速 30m という言葉を聞いたことがあるね。

莉緒 はい。瞬間最大風速 60m のものすごい台風という言葉聞いたことがあります。

雅人 この風速の単位は m/s だ。だから風速 10m とは 10[m/s] の

風が吹くことを意味する。これは、10 秒で 100m 進むことから、オリンピック競技の陸上 100m のトップ選手と同じ速度となる。だから、結構強い風なんだ。

しのぶ ただし、風速よりも時速のほうが、わたしにはなじみがあります。10[m/s] は、1 時間が 3600 秒だから、36000[m/h] つまり 36 [km/h] で、時速 36 km のことです。自転車よりもかなり速く、自動車の速さに近いですね。台風の風速 30m は、時速 108 km となり、瞬間最大風速 60m は、なんと時速 216 km ですから、新幹線なみのスピードとなります。こちらのほうが分かりやすいです。

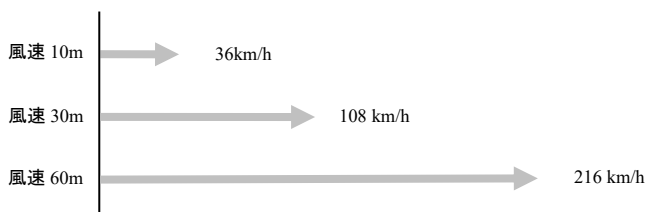


図 2-7 風速と時速の対応関係

雅人 確かに、身近な乗り物の速さは時速で表示されるから、そのほうが分かりやすいね。ところで、風速は常に変化するから、風速 10m とは 10 分間の平均速度が 10[m/s] という意味なんだ。

直道 なるほど、風速 10m と言っても、瞬間的にはもっと速いこともあるのですね。確かに、突風が吹くことがあります。そうか、台風のときに瞬間最大風速などという用語を使うのは、このため

ですね。

雅人 その通り。そして、風力発電にとって適した風速というものもある。だいたい 5[m/s] 以上 20 [m/s] までと言われている。ただし、文献によって数字は異なるし、下限の風速は技術開発でどんどん下がっている。そよ風程度でも発電することも可能となっている。

和昌 なるほど、風力発電にとって好ましい風速があるのですね。

雅人 ここで、ドイツについて調べてみると、年間を通して 6[m/s] を越える風が常に吹いていることが分かる。しかもほぼ全土の土地が平坦だから、風力発電機も設置しやすい。つまり、ドイツは風力発電に適した国ということが言える。すでに 19000 基の風力発電機が設置されているそうだ。

しのぶ それは、すごい数ですね。

雅人 イギリス、オランダ、デンマークなどヨーロッパでは風力発電に適した風が吹く。だから、風力発電が再生可能エネルギーとして広く浸透したと言える。みんなも知っているように、オランダの風車は有名だね。

直道 確かに、オランダと言えば、チューリップと風車が並んだ風景を思い出します。ところで、日本における風力発電の将来性はどのようなのでしょうか。

雅人 ヨーロッパに比べると風力発電には向いていないと思う。国土が狭く、平地も少ない。風もそれほど強くはない。

ただし、繰り返しになるが、エネルギー源は多様であるべきという信念は変わらない。だから、日本においても風力発電の導入は重要と思う。なにしろ、風をプロペラで受けて、それを磁石の回転に直接利用できるから、単純な発電方式だ。プロペラは飛行機などで実績があるから、技術開発も進んでいる。

2.5. 風力発電の出力

しのぶ エネルギー源の多様性は、いつも先生が強調されていますね。ところで、風力発電の出力はどの程度なのでしょう。

雅人 それでは、実際に見積もってみよう。まず、風速を 10m/s としよう。そして、風を受ける断面積を 1m^2 としようじゃないか。

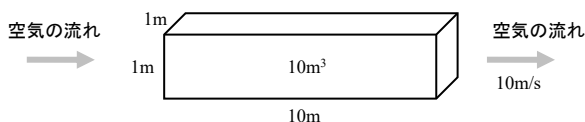


図 2-8 断面が $1 \times 1 \text{ m}^2$ の空気が、風速 10m/s で移動する場合の様子

莉緒 そうすると、1 秒間に 10m^3 の空気が移動するのですね。この体積の空気の質量 $m \text{ kg}$ が分かれば運動エネルギー $(1/2)mv^2$ が計算できますね。

和昌 気体の場合は種類に関係なく、気体 1mol の体積は 22.4ℓ で

した。1ℓは1000cc = 1000cm³ですから、22.4ℓ は22400 cm³ となります。ここで、1m³ = 10⁶cm³ ですから、空気 10m³ は 10⁷cm³ となるので、その mol 数は

$$\frac{10^7}{22400} = \frac{10^7}{2.24 \times 10^4} = \frac{1000}{2.24} \cong 446 \text{ [mol]}$$

となります。

しのぶ 後は、空気 1mol が何 g かを求めればよいのですね。空気は 20% が酸素 O₂、80% が N₂ からできているとします。O₂ の 1mol は 32g、N₂ の 1mol は 28g なので、空気 1 mol の質量は

$$32 \times 0.2 + 28 \times 0.8 = 28.8 \text{ [g]}$$

となります。とすれば、446 mol では

$$28.8 \times 446 \cong 12845 \text{ [g]}$$

から 12.845 kg となります。

直道 とすると、断面が 1m² で風速が $v = 10 \text{ m/s}$ の風が発生できる 1 秒あたりの運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 12.845 \times 10^3 \cong 642 \text{ [J]}$$

となります。これは、642 [J/s] = 642 [W] となります。

しのぶ こうしてみると、それなりの発電能力があるのですね。オーダー的には、マイクロ水力発電と同程度です。ただし、これは、川の流れが 1m/s に対し、風速を 10m/s とみなしているから、空気の密度が低くともエネルギーが大きくなるのですね。エネルギーは速度の 2 乗に比例しますから、水力とはファクターにして 100 の違いが出ます。

和昌 一方で、空気は気体だから、 1m^3 の体積の質量は、水よりも、はるかに小さいですね。

雅人 いまの値は 1m^2 の面積に対応したものだが、風力発電機はもっと大きい。たとえば、プロペラの長さが 10m の大型風力発電機ではどうなるだろうか。

直道 単純に、風を受ける面の面積が円とすれば $10 \times 10 \times 3.14 = 314 [\text{m}^2]$ となりますから、出力は 201588 W つまり、約 201.6 kW と計算できます。

莉緒 この出力で、1 日稼動すれば、 $202\text{kW} \times 24 \text{ h} = 4848 \text{ kWh}$ の出力となりますね。さらに 1 年では $4848 \times 365 = 1769520 \text{ kWh}$ という電力量となります。

しのぶ 一般家庭での年間消費量が約 5000kWh でしたから、 $1769520/5000 = 354$ から、これは、354 戸分の年間消費電力となります。

雅人 このように、風力発電機を巨大化すれば、かなりの発電能力を発揮することができる。大きければ大きいほど出力も増える。だから、いまではプロペラの径が $50 \sim 60 \text{ m}$ の風力発電機も登場している。

しのぶ それは、とてつもない大きさですね。単純計算では、エネルギー量は 10m の径に比べて、25 倍から 36 倍となります。ただし、こんな大きな発電機を建設するのは、かなり大変ですね。

雅人 そうなんだ。これがドイツのような平地であればなんとかなるが、山の上に建設するとなると、基礎工事や道路も通さないといけないから、コストは巨額となる。もちろん、メンテナンスも大変だし、送電もやっかいとなる。

莉緒 やはり、先生が言うように、水力と同じように風力も小型のものがよいように思います。

雅人 そして、基本は地産地消と思うよ。風力のような気まぐれな電源を基幹電源として利用しようとする、変動に対する補償が必要となる。だから、基幹電力網の負荷を減らすために、風力を自分たち用に使うというのが基本と思う。実は、再生エネルギー導入で大成功していると言われているドイツでも、ロシアからの天然ガスのパイプライン建設を進めている。風力だけでは安定電源とはならないんだ。

莉緒 確かに、工場の電源に風力を使っていて、風が止まったらラインを止めざるを得ませんね。それを補償するための別の電源が必ず必要となります。

2.6. 洋上風力発電

雅人 実は、日本でも注目を集めているのが**洋上風力発電** (offshore wind power) だ。ドイツでは風力発電が普及しているけれども、総発電量の20%程度と言ったよね。もちろん、日本の普及率1%に比べればものすごい数値だが、ドイツはこれをもっと増やしたいんだ。ところが、陸地には設置場所がもうない。そこ

で洋上に建設しようと計画している。いまは 2% 程度だが、今後増やしていく予定と聞いている。北海やバルト海では、結構な風が吹くし、水深が浅いので、建設に適しているんだ。

和昌 洋上風力発電ですか。確かに海の上ならば、住民とのトラブルもないですね。日本でも回転機から発生する低周波の問題や、バードストライクなど、野生動物や鳥の被害、そして、建設工事にともなう環境破壊などで住民から設置に対する反対運動が起こっていると聞きました。

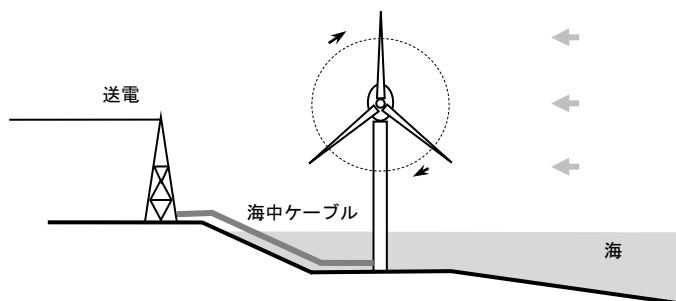


図 2-9 洋上風力発電の模式図

雅人 そうだね。日本は国土面積が小さいので立地場所も限られる。それに、無理に巨大な風力発電機を設置しようとすれば住民の反対運動も起こる。それが、洋上ならば、大きな問題にはならない³。

³ もちろん漁業権や、海洋資源への影響などの問題は生じる。

しのぶ 確かに海ならば、環境問題も、それほど大きくないと思いますが、洋上に風力発電機を設置するというのが、そもそも可能なのでしょうか。

雅人 すでにヨーロッパでは実績がある。イギリス、デンマークを始めとして導入例はたくさんある。ドイツも陸上には設置場所がないから洋上をターゲットにしている。

和昌 海に設置する場合には、海底に基礎工事をして発電機を設置するのでしょうか。

雅人 水深が浅い場合には、図 2-9 のように、海底に着床するかたちでの設置が可能だ。ただし、それが難しい場合には、浮体式となる。

しのぶ 大型の風力発電機を浮かせるのですか。結構、安定性が問題になりそうですね。

雅人 浮上式タイプは、まだまだ開発途上だが、イギリスでは、すでに稼動しているものもある。ただし、ヨーロッパで成功例があるからといって、日本で成功するかどうかは分からない。一方で、化石燃料を消費しない発電方式という魅力もあるから、その技術開発は重要とは思う。

莉緒 やはりエネルギーの多様性が大切なのですね。ところで、**地熱発電 (geothermal power generation)** も再生可能エネルギーの仲間と先生は言われていましたね。

2.7. 地熱発電

雅人 地熱発電は、太陽の恵みではなく、地球内部にある熱源つまり地熱を利用した発電だ。基本的には地熱は、今後も永きに渡って利用し続けることができるという観点から、再生可能エネルギーに分類されている⁴。

しのぶ なるほど。地球の内部の高温は、今後も維持されるということですね。

和昌 しかし、地球が誕生したのが 46 億年前です。それにもかかわらず、地球のコア温度がいまだに 6000℃と超高温というのが不思議です。本来ならば、とっくに冷え切っていてもおかしくないのですよね。

雅人 そうだね。これも地球の不思議のひとつであり、まさに奇跡だね。

直道 「低炭素社会」ゼミでは、地球の内部には放射性元素があって、その核分裂反応によって熱を発しつづけている可能性があるということを先生はおっしゃってましたね。

雅人 そう考えないと説明がつかないんだ。いくらなんでも 46 億年もの年月を、なんの熱源もなく温度が 6000℃ に保たれている

⁴ 活火山があれば地熱発電は可能となる。火山の寿命が 10 万年以上とすれば、実質的な再生可能エネルギーと考えられる。ただし、真の意味では再生ではない。

ことはありえないからね。

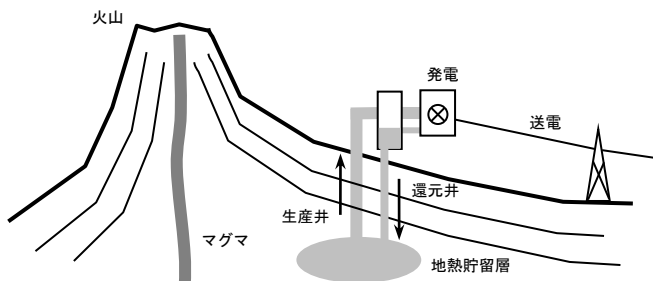


図 2-10 地熱発電の模式図。地下水が地中に浸透してできた地熱貯留層から、水蒸気を取り出しタービンを廻して発電する。火山の地下 5～15km にはマグマ溜りがある。

しのぶ 地殻の下には、溶融したマントル (mantle) があって、このマントルがマグマ (magma) となって地殻の割れ目などから地表に出てくるのが火山でしたね。

雅人 世界の活火山は 1500 程度あると言われている。その地下 5～15km の深さにマグマ溜り (mantle reservoir) があり、このマグマが地上に噴出してできるのが火山 (volcano) だ。

しのぶ 日本も火山国でしたね。日本には、どれくらいの活火山 (active volcano) があるのでしょうか。

雅人 数は、108 程度と言われているね。ちなみに富士山も活火

山なので、噴火する可能性がゼロではない。マグマの温度は1000°C程度もあり、熱伝導によって、まわりの岩盤を暖めているんだ。

直道 温泉 (hot spring) は、地下に染み込んだ雨水などが、マグマの熱で温められたものと聞いたことがあります。

雅人 そうだね。温泉は、自然に湧き出ることあれば、**ボーリング (drilling)** と言って地中に井戸を掘って取り出すこともある⁵。都内でもボーリングによって温泉が噴き出したという話をよく聞くだろう。日本は火山国だから、どこを掘っても温泉が湧き出す可能性があるんだ。

和昌 地熱発電というのは温泉の熱水を利用し発電しているのでしょうか。

雅人 そう誤解しているひとも多いね。だから、地熱発電によって温泉が涸れることを心配する人もいるくらいだ。実は、地熱発電は温泉利用ではないんだ。地下 1000m から 3000m の深さに、マグマの熱によって温められた**熱水溜り (hot water pool)** が存在することが知られている。これを**地熱貯留層 (geothermal reservoir)** とよんでいる。ここに溜まった**地熱流体⁶ (geothermal liquid)** を利用して発電するのが地熱発電だ。

⁵ ボーリングの英語は boring であり、孔を穿つという意味があるが、井戸を掘るという意味では、drilling のほうが適訳である。

⁶ 地熱流体とはマグマによって熱せられた高温高圧の熱水や水蒸気のことを指す。

しのぶ この層は、水を通さない岩盤などの上にてできているのでしょうか。しかし、結構な深さですね。

雅人 そうだね。水を透さない地層を不透水層とよんでいる。この地熱貯留層はとても深いところにあるので、ボーリングも決して簡単ではない。図 2-10 に示すように地熱貯留層に、直接パイプを入れて、そこから地熱流体を取り出す。このとき噴出する水蒸気を利用してタービン（磁石）を回転させて発電するのが、地熱発電だ。

直道 このパイプが**生産井** (production well) でしょうか。

雅人 そうだね。この井戸が発電に必要なエネルギー源である高温の水蒸気を取り出す主役となる。

和昌 もうひとつある**還元井** (injection well) とは、どのような働きをするのでしょうか。

雅人 地熱貯留層からは、高温の水蒸気とともに、熱水も出てくる。発電に必要なのは高温の水蒸気なので、熱水のほうは地下に戻してやる。これが還元井だ。こうすれば、ふたたび熱資源として利用することができる。

直道 なるほど。それは、ひとつの循環モデルですね。

莉緒 日本は火山国ですから、いたるところで地熱発電が可能なのではないのでしょうか。

雅人 そうなのだが、問題は、どうやって巨大な地熱貯留層を見つけるかだ。なにしろ深さが 1000～3000m のところにある。確実に位置を探索する方法があればよいのだが、そこが難しい。そこで、ある程度の当たりをつけてボーリングするのだが、何もなければ大きな損失が出る。

和昌 なるほど。確かに、そこが問題ですね。実は、ふるさとの岩手には地熱発電があります。松川発電所は 1966 年に日本で地熱発電を始めた第 1 号ですが、温泉を探していて、偶然に熱水溜りを見つけたことが契機と聞きました。

雅人 いずれ、地熱貯留層をいかに探索できるかが課題となる。

しのぶ それは難しそうですね。

雅人 いまは、その研究も進められていて、最近では超伝導を利用した探索方法も検討されているんだ。超伝導を使うと、ものすごい小さな磁場の変化を捉えることができる。それを利用しようというものだ。国も支援している。

莉緒 地熱貯留層は地下の深いところにあるので、井戸を掘るにはコストがかかるのではないのでしょうか。

雅人 3000m の地下となると、確かにコストはかかるが、場所さえ特定できれば、採算性は十分ある。

しのぶ ところで、地熱発電の効率はどのようなのでしょうか。水蒸

気を直接使えるので、比較的高いように思えるのですが。

雅人 この発電の基本は熱機関と同じだね。このとき効率は

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

と与えられる。高温が T_H 、低温が T_L だった。地熱発電では、低温部は室温となるので、 20°C としよう。高温側は、地下から噴出する水蒸気を直接利用しており、 150°C 程度だ。温度は絶対温度 K にする必要があるから

$$\eta = \frac{(150 + 273) - (20 + 273)}{150 + 273} = \frac{130}{423} \cong 0.3$$

となり 30% となる。

莉緒 なるほど、地熱発電の効率は高くはないのですね。イメージと違いました。

雅人 ただし、これは熱機関としての効率だ。地熱発電では、いっさい高価な燃料を必要としない。さらに、一度発電設備を建設すれば、あとはメンテナンスコストだけで発電し続けることができる。そういう意味では、有望なエネルギー源と思うよ。

和昌 世界の状況はどうなのでしょう。火山は 1500 個あるということでした。

雅人 実は、地熱発電開発は、いまのところアメリカ、日本、インドネシアが中心となる。これらは、環太平洋火山帯 (ring of fire) に沿った国であり、いずれも火山国だ。そういう意味では、日本

には地の利がある。

直道 それは有望ですね。

雅人 そうなんだが、火山のある地域は大抵が**国立公園** (national park) に指定されている。当然、開発には制約も多い。だから、今後は、エネルギー政策もにらみながら、開発をどのように進めるかを議論する必要がある。

しのぶ 地熱を利用する発電は、シンプルで、しかも地熱貯留層さえあれば実現可能なのですから、恵まれた日本としては開発を進めるのが得策なのではないでしょうか。

ところで、先生、再生可能エネルギーとしてバイオマスもよく耳にしますね。

2.8. バイオマス発電

雅人 まず、一般のひとにとっては「**バイオマス**」という用語が分かりにくいよね。英語では biomass となる。bio-というのは、「生物の」「生体の」という意味の接頭語だ。例えば、学問の生物学は biology となる。つぎに、マスは英語では mass で質量のことだ。物体の質量を m として本ゼミで扱ってきたよね。

和昌 先生の説明を聞いてもよく分かりません。

雅人 マスの意味が不明だよね。簡単に言えば、生物資源（植物、動物、微生物）の量となる。

莉緒 生物由来ということであれば、化石燃料の「石油」や「石炭」もバイオマス燃料の仲間なのでしょうか。

雅人 いい視点だね。実は、化石燃料はバイオマスには入れないんだ。そのため、バイオマスのことを「生物由来の有機性資源で化石燃料を除いたもの」という説明もある。

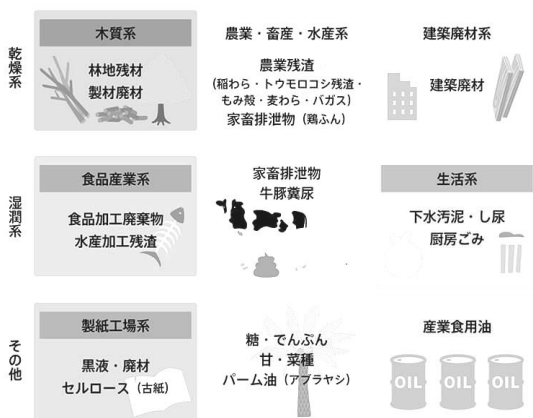


図 2-11 バイオマス資源の分類 (資源エネルギー庁ウェブサイトより転載)

しのぶ なにか、しっくりこない定義ですね。それでは、バイオマスとは、具体的にはどのようなものなのでしょうか。

雅人 もともとは、生態学 (ecology) の専門用語であり、ある地域にある動物や植物由来の資源の総量という意味がある。いま、

注目されているのはバイオマス発電で、生物由来の資源で、それまで捨てられていたものを燃料として有効利用しようというアイデアなんだ。

直道 なるほど、廃棄されていた生物資源を燃料に使うということなのですね。

雅人 バイオマス発電では、資源として、いくつか特徴的なものがあるから、それを紹介しておこう。

わたしがバイオマスを最初に知ったのは、製材所の残材利用だ。つまり、木材加工時のゴミで、当時は廃棄していたからね。それを木材チップにして燃料として使おうという計画だった。

莉緒 木材ならば、もともと燃料として普通に使われていますから、わざわざバイオマスなどと大げさに言う必要はないと思いますが。

雅人 そうだね。薪ストーブのたきつけなどにも使われていた。しかし、大量に出る木屑の処分に困っていたのも事実なんだ。だから、燃料として有効利用しようと考えたのだと思う。

しのぶ いずれ、木材ならば燃料として使えるということですね。ゴミとして捨てるものを資源に利用するということのだからとてもよいことだと思います。

雅人 木の残材などは、木質系バイオマスとして重宝されている。農業残材も注目されている。有名なのは稲わらや籾殻だね。これ

らも大量に出る。昔は田んぼで野焼きをしていたりしたのだが、**ダイオキシン (dioxin)** 騒ぎで、そういう処理ができなくなった。

直道 ダイオキシン騒ぎとはなんでしょう。

雅人 ダイオキシンとは、ベトナム戦争のときに米軍が使った枯葉剤の中に含まれる成分の一種で、その後、ベトナムでの不妊や奇形児の誕生、また米軍兵士にガンが多発するなど世界的な問題となった。

このダイオキシンが、ごみ焼却で発生することが分かり社会的問題になった。日本でも所沢で起きた風評被害はひどかった。そして、すべての野焼きが敵視され、いまでは焚き火さえもできなくなっている。

和昌 そんなことがあったんですか。

雅人 ダイオキシンとは2個のベンゼン環からなる炭素化合物で、塩素 Cl を含んだものだ。いろいろな種類があることが知られている。塩化ビニールなどを普通のゴミと一緒に焼却すると、発生する可能性があるんだ。

しのぶ それは、とても怖いですね。特に不妊や生まれてくる子供への影響があるとなると、心配です。

雅人 稲やモミからダイオキシンが出るわけではないが、焚き火なども含めて外で煙を出すことができなくなっている。煙になにが含まれているか分からないから、みんな怖いんだ。

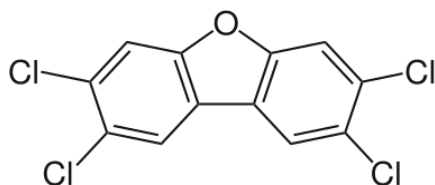


図 2-12 ダイオキシンの構造。2 個の Cl で置換されたベンゼン環が 2 個結合した化合物。この他にもいろいろな構造が存在する。

しのぶ そういえば、小さい頃は、落ち葉を集めて焼いていましたね。おじいちゃんが焼き芋をつくってくれたことを覚えています。

雅人 かつて、稲作がさかんだったころは、大量に出る稲わらや粃殻を田んぼで焼いていたんだが、煙がひどくて社会問題になったこともある。煙は目にしみるし、喘息のひとつにとっては耐えられない。いずれ、野焼きはもうできないのなら、少々コストがかかっても、バイオマス燃料として使おうというのは理にかなっていると思うよ。

莉緒 その他には、どんな材料があるのでしょうか。

雅人 水産加工や食品加工で出る残渣、家畜の排泄物や下水汚泥などもバイオマス燃料となる。

和昌 これらは、すべて廃棄されるものですから、それを有効利用するのは大変よいことですね。ゴミの有効利用です。

雅人 いまでは水洗トイレが普及しているが、一昔前までは、ひとの排泄物は畑の肥料として有効利用されていたんだ。

しのぶ えっ、そうなんですか。とても想像できません。それに、そんな野菜は口にしたくありません。

雅人 まあ、そう思うのは無理はないか。それから、残飯や使い古しの食用油などもバイオマス燃料となる。

直道 なんでもかんでもバイオマスなのですね。

雅人 ああ、生物由来の物質は、すべて炭素 C を含んでいる。なので、燃やせば燃料として使えるんだ。

2.9. カーボニュートラル

和昌 それでは、二酸化炭素 CO_2 が発生するので問題となるのではないですか。

雅人 それが面白いところで、IPCC も問題ないと言っているんだ。

直道 言っている意味が分かりません。

雅人 その理由はこうだ。「バイオマスを燃焼した際に放出される CO_2 は、化石燃料の燃焼によって発生するものと異なり、植物の成長過程で光合成により、大気中から吸収した CO_2 であるため、新たに CO_2 を発生させない」と。そして、これをカーボニュー

トラル (carbon neutral) とよんでいるらしい⁷。

しのぶ でも、石炭だってもともとは植物だったのですよね。その炭素だって大気中から光合成で吸収したもののなので、こちらもカーボンニュートラルではないのですか。

雅人 その通りと思うが、化石燃料はバイオマスではないとし、一方で、バイオマスの燃焼は、カーボンニュートラルと言い張っている。

莉緒 なんかすっきりしません。では、木炭はどうなのでしょうか。

雅人 木炭は再生可能エネルギー材料とされている。木には水分やセルロース (cellulose) が含まれている。セルロースとは $C_6H_{10}O_5$ を単位とした炭水化物だ⁸。木を酸素のない状態で蒸し焼きにすると、最後には炭素 C となる。これが炭だ。そして、 $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 394 \text{ kJ}$ の反応では、炎もでないし、煙も出ない、長時間使用できるという利点があり、燃焼熱も大きい。

しのぶ この反応は石炭の反応と同じですよ。だったら、石炭も立派なバイオマスと思うのですが。

⁷ この考えは、京都会議で導入されたもので、光合成により CO_2 を吸収して成長するバイオ燃料を燃やしても、「京都議定書」"Kyoto protocol"における取り扱いでは、 CO_2 を排出しないものとされている。

⁸ セルロースの分子式は $(C_6H_{10}O_5)_n$ と表される多糖類である。植物繊維の主成分であり、天然の植物質の約 1/3 を占める。

雅人 まあ、石炭の生成には長い年月が必要だから、簡単に再生可能ではないということなのだろう。

直道 そうは言っても、石炭の原料の植物だって光合成によって大気中の CO_2 を取り入れたものであることに変わりません。それならば、カーボンニュートラルでよいのではないのでしょうか。

雅人 みんなには炭酸飲料の話をしたことがあるよね。あの泡は二酸化炭素 CO_2 だ。ビールの泡も CO_2 だ。しかし、これらを問題にはしない。これもカーボンニュートラルで片付けられている。まず、炭酸飲料の泡は、もともと大気中にあったものだから問題ないらしい。ビールの CO_2 も麦やホップが光合成で大気中から取り込んだものだから、カーボンニュートラル。だから、心配しないで、どんどん消費しても問題ないと言われている。おかしくないかい？

しのぶ 化石燃料も、元々が生物由来なのであれば、大気中に入った二酸化炭素 CO_2 を取り入れただけですね。

雅人 そうだね。年月がかかったとしても、カーボンニュートラルであることに変わりはない。

和昌 ところで、先生は、以前、野菜の成長を促すために、ビニールハウスの中に二酸化炭素 CO_2 を入れるという話をされていましたね。それならば、大気中の CO_2 が増えたなら植物の成長が促されるだけなのではないのでしょうか。その影響はどうなんだろうと、いつも思っていました。

雅人 確かに、二酸化炭素濃度の上昇が、植物の成長に与える影響は、とても重要と思う。温室栽培では、CO₂ 導入によって野菜や果物の成長が大きく促進されているからね。500ppm で成長量が12% 上昇したというデータもある。逆に250ppm に減少すると、成長量が20% 下がるという報告もある。

莉緒 いま、地球を破壊されている二酸化炭素 CO₂ 濃度は400ppm でしたね。300ppm が400ppm に増えただけで地球温暖化し、異常気象が発生すると。でも、一方では、植物の成長が促進されて、CO₂ を吸収して栄養素として植物中に蓄えられるのではないのでしょうか。逆にCO₂ 濃度が下がると、植物の成長が抑制されるという弊害もありますね。

雅人 そういうプラスの面を主張するひとたちも多いのも事実だ。

しのぶ ところで、最近のニュースでは、アマゾンの密林 (jungle; thick forest) が焼畑農業や、山火事で、どんどん消えているため、CO₂ 濃度上昇を引き起こしているという話を聞きました。これは、人類にとっての大きな危機だとも。でも、密林が蓄えていた炭素は、もともと大気中にあったCO₂ です。だったら、それを放出してもカーボンニュートラルということになってしまいます。

雅人 理屈では、そうなるね。密林が再生しさえすればカーボンニュートラルとなる。しかし、それには長い年月が必要となる。「大気から取り入れたCO₂ を放出するだけなら問題ない」という考えには、時間軸の考えがまったく含まれていない。そうであれ

ば、化石燃料もカーボンニュートラルということになる。

2.10 炭素固定

直道 先生、ここで提案です。バイオマスには CO_2 が炭素の化合物として蓄積されています。それを燃料として使ったのでは、再び CO_2 を大気に放出してしまいます。それならば、燃料などとして使わずに、腐食しないような処理をして、地中に埋めておけばよいのではないのでしょうか。

雅人 まったく同感だ。バイオマスによる炭素の固定は重要な視点だと思うよ。バイオマスから、余分な水分をとれば体積も減る。例えば、木炭は究極の炭素固定技術なんだ。だから、燃やさずに保存しておけばよい。

しのぶ 日本の木材建築は、まさに炭素固定技術ですね。

雅人 その通りだ。木材の重量の 50% が炭素 C となる。つまり巨木には、たくさんの炭素が含まれている。まさに、究極の炭素固定技術なんだ。

莉緒 いま、大気中の CO_2 濃度を減らすために、 CO_2 を高压で圧縮して地中や海中に埋める技術開発が検討されていると聞きました。そんなコストの高い不安定な技術より、バイオマスによる炭素固定のほうが、はるかに簡単でスマートな方法と思います。

雅人 実は、徹底的にバイオマスを乾燥したうえで保管するのが

炭素固定技術として有望ということを政府に提案したことがあるんだ。それでは予算がつかないと役人から却下されてしまった。この方法だと、最先端技術が必要ないから、政治家を含めて素人受けしないということらしい。

莉緒 先生、それは本当なんですか。なにかやり切れませんね。なぜ、本質を議論できないのでしょうか。

雅人 これは、いろいろな分野に言えることだ。たとえば、世界は電気自動車にシフトしている。しかし、電気は2次エネルギーであり、それをつくる段階でCO₂を放出している。ちょっと考えれば分かることなのに、政策決定の場に、科学リテラシーのある人材がいらないんだ。だから、バイオマスの炭素固定という正の側面も無視される。

しのぶ 前回の「低炭素社会」ゼミの議論では、CO₂濃度の上昇が地球温暖化を招き、異常気象を引き起こして地球を破滅させるという単純な結論はおかしいということになりました。

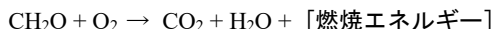
さらに、CO₂濃度が高いと野菜の成長が促進されるという話もありました。とすれば、高いお金をかけて、CO₂を無理やり固定する必要があるのでしょうか。

雅人 そこは重要なポイントだね。わたしは、CO₂は人間にとって、とてもやさしい気体と思っているんだ。

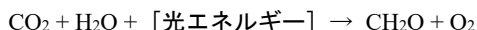
和昌 「低炭素社会」ゼミの時も、そう言われていましたね。

雅人 長い歴史の中で、地球の大気は、窒素 N_2 、酸素 O_2 、アルゴン Ar、二酸化炭素 CO_2 が主成分として落ち着いている。これらのガスは無味無臭で、しかも、人間には無害の気体だ。

そして、生物（動物と植物）は O_2 を吸って CO_2 を排出する呼吸でエネルギーを得ている。



一方、植物は、呼吸だけでなく CO_2 を取り入れて、太陽エネルギーの恵みによる光合成



で栄養分である炭水化物 CH_2O をみずからつくり出している。このように、 CO_2 は地球上の生物が生きていくためのサイクルに見事に取り組まれているんだ。

しのぶ 言われてみれば、確かにそうですね。

雅人 いずれ、もし本当に、大気中の CO_2 を減らしたいならば、カーボンニュートラルというような屁理屈はやめて、単純に CO_2 を減らす策をとるべきなんだ。その場合には、バイオマスは燃料としてではなく、 CO_2 を固定できる貴重な存在として、乾燥したうえで地中に保存することを考えるのが得策と思う。

しのぶ 前にも言いましたが、木材建築というのは賢い炭素固定方法になっていますね。木は燃やしてしまえば、 CO_2 を放出しますが、木のままでいれば C が固定されますし、 CO_2 を出しません。

雅人 日本の神社仏閣を始めとする家屋は木材でできているが、これは立派な炭素固定だ。だから、日本を含めて世界は、木材を

建築物や家具などに積極的に利用すべきなんだ。そして需要が増えれば、植林も可能となり、炭素固定がさらに進むことになる。なにしろ、木が吸収した CO_2 が、セルロースなどに変化して、木の重量として蓄積されていく。それを伐採して保存し、新しい木を育成すれば良いんだ。

莉緒 先生、繰り返しになりますが、その前に CO_2 が地球環境の破壊者なのかどうかを、真剣に議論すべきではないでしょうか。

雅人 その通りだね。いまの世の中は、その議論がすっぱり抜けて結論だけが先に来ている。もちろん、基本的な温暖化機構についての議論もあるが、専門家でさえ、そこは避けて通っているよね。前回のゼミでも紹介したが、政治家を含む多くの素人は CO_2 が温暖化を引き起こす元凶であるという結論を前提として話を進めている。難しい話なので、仕方がない面もあるが、そこが、すべての肝だよね。

直道 特に、2021 年のノーベル物理学賞が「 CO_2 による地球温暖化のモデル構築」に授与されましたので、もう、覆ることはないのでしょうか。

雅人 残念ながら、その通りと思う。しかし、われわれは科学的考察を大事にしないといけない。どんなに世間のバッシングを受けても、真実を明らかにする努力を怠ってはいけないと思う。

2. 11. バイオ燃料

和昌 ところで、バイオエタノール (bioethanol) が燃料として注目を集めていると聞きましたが、これもバイオマス的一种なのでしょうか。

雅人 そうだね。バイオマスエタノール (biomass ethanol)とよぶこともある。その製造工程は、お酒とほぼ同じだ。

直道 そう言えば、お酒の原料は小麦やお米ですね。しかも、お酒の主成分はエタノールです。

雅人 エタノールはエチルアルコール C_2H_5OH のことだ。いま期待されているのは、サトウキビやトウモロコシを原料としたバイオエタノールだ。これらは大量に生産されているからね。いずれも、お酒がつくられている工程と同じなので、新たな技術開発も必要ない。

しのぶ バイオエタノールは、植物由来ですから再生可能エネルギーですよ。

雅人 そうだね。これらの植物を育成するかぎり、資源は枯渇しない。

莉緒 とすれば、将来的にも有望なエネルギーですね。

雅人 そうならばいいんだが、課題も多い。飲料のアルコールな

らよいが、燃料では使う量がまったく異なるし、燃料があんな高い値段では誰も買わないよね。それに、世界中の穀物を原料にして、エタノールをつくったとしても、いまの燃料供給には、まったく足りないんだ。

直道 そうなんですね。

雅人 ただし、枯渇しない燃料ということは確かだから、今後も開発していく必要はあると思う。

しのぶ 最近、ミドリムシ (euglena) から燃料をつくるというアイデアもありましたね。確か、飛行機も飛ばしたと話題になりました。

雅人 バイオジェット燃料だね。ミドリムシは光合成ができるから、水と二酸化炭素と太陽光があれば、炭水化物を合成できる。だから燃料ができるんだ。

莉緒 とすれば、バイオジェット燃料は、燃やせば CO_2 が発生しますね。環境活動家からすれば、何のメリットもないのではないのでしょうか。

雅人 確かにそうだね。われわれは、 CO_2 が地球温暖化や異常気象の原因と結論することには疑問を抱いているが、世界はそうではないからね。つまり、バイオジェット燃料は、バイオマス燃料と同じで、彼らにとっては、地球にやさしくないエネルギーとなる。ただし、メリットは枯渇する心配がないということだね。

しのぶ コストはどのようなのでしょうか。バイオエタノールはお酒と同じだから、結構高いと言われていましたが。

雅人 2020年現在で1リットル当たり1万円らしい。みんなも知っているとおり、ガソリンの値段の高い日本でも1リットル150円程度だから、とてつもなく高い値段だ。

直道 そんなに高いのですか。

雅人 今後、ミドリムシの培養技術が進み、大型プラント化すれば値段は下がる可能性もある。人類としては、今後も注目すべき技術だね。ただし、いまの世界のようにCO₂排出を敵視しているかぎりには、飛躍は難しいだろうね。

和昌 とすれば、環境活動家としては、CO₂を排出しない再生可能エネルギーとしては、**太陽電池 (solar battery)** が決定打になるのでしょうか。

2.12. 太陽光の応用

雅人 地球は太陽の恵みで繁栄した太陽系の一惑星だ。いままで紹介してきた再生可能エネルギーは、地熱を除いてすべて太陽エネルギーが源となっている。

しのぶ なるほど。その意味では、太陽光を直接利用するエネルギー源は分かりやすいし、本質的なですね。

雅人 ただし、太陽光から直接電力を得るという太陽電池はかなり遅れて登場した技術なんだ。もともと人類が利用してきたのは、太陽光そのものを直接利用するというものだ。

直道 小学校の頃は、紙に鉛筆で黒丸をつけて、虫眼鏡で太陽光をあてて紙を焦がすという遊びをやっていました。あれが、太陽光の利用ですね。本当に火がつくので驚きました。

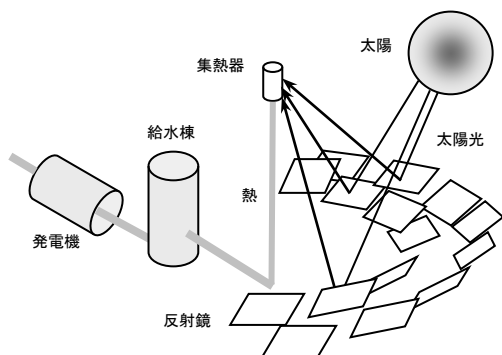


図 2-13 太陽熱発電の原理。凹面鏡を使って、太陽光を集熱器に集めて加熱する。この熱を利用すれば発電が可能となる。

雅人 レンズを使って太陽光を集光させて熱することも、よくやられているが、より大型の利用では凹面鏡を使うのが一般的だね。
オリンピックの聖火 (the Olympic torch) は、ギリシャのオリンピアで太陽光を利用して点火されている。

莉緒 中学校の頃に、アルキメデスが鏡をたくさん使って太陽の

光を集光させ、ローマ船を撃退したという話も聞きました。とても面白かったです。

雅人 そのためには、数学の知識が必要だが、アルキメデスは数学の天才でもあったからね。この話をまゆつばというひともいるが、MIT が実際に可能なことを実験で確かめているんだ。

しのぶ 面白いですね。

雅人 このように、太陽熱の利用は人類が古くから行ってきている歴史のある技術なんだ。

直道 でも、太陽電池に比べると、それほど注目を集めていませんね。

雅人 補助金が出ないからね。太陽電池にはかなりの補助金がつぎ込まれている。電気の買取り制度などもあり、悪徳業者や詐欺の温床にもなっている。

しのぶ でも太陽熱を直接使うというのはとてもシンプルで分かりやすいですね。

雅人 そうだね。いちばん、シンプルなのは、太陽光を凹面鏡で集めて、太陽炉 (solar furnace) として加熱装置に使う応用だね。世界各国で開発が進められている。

莉緒 以前にテレビの科学番組で、太陽炉を使って調理する実験

を行っていました。晴れてさえいれば何でも調理できるので驚きました。玉子焼きも簡単にできていました。

雅人 太陽熱利用の課題はまさに「晴れてさえいれば」なんだ。曇ったら使い物にならない。これが普及しない理由のひとつかな。

和昌 太陽光を集めることで、どれくらいの温度に達するのですか。

雅人 フランスの国立研究所が、直径 50m の反射鏡を使った実験で 3000℃ が達成されている。

直道 それは、すごいですね。それなら、アルキメデスの伝説も信用できます。

雅人 火力発電のところでも説明したように、高温の熱源さえあれば発電が可能だ。例えば、水を加熱して水蒸気を発生させタービンを廻せば発電ができる。これを**太陽熱発電 (solar thermal power generation)** とよんでいる。

和昌 結局、太陽が出ていないと発電できないということがネックなのですね。

雅人 その通り。後は、夜は発電できないから、朝になって立ち上げるのにも時間がかかる。だから、日本では、まったく実用化されていない。

しのぶ 海外はどのようなのでしょうか。

雅人 まず、砂漠のある国では、日照時間が長いから稼働時間が長い。しかも、複雑な設備を必要としないからインフラが整っていない国でも発電が可能だ。だから、多くの国で太陽熱発電所が稼働している。

直道 なるほど、太陽熱発電にとって好立地の国では稼働しているのですね。ちょうどヨーロッパで風力発電が盛んなことと似ていますね。

雅人 その通りだね。実は、日本では、発電は実用化されていないが、太陽熱を利用した応用が結構浸透しているんだ。それが何か分かるかな。

和昌 サンルームでしょうか。窓を広くして、断熱材を入れれば冬でも暖房が要らないと聞いたことがあります。

雅人 それも応用のひとつだが、答えは、太陽熱温水器 (solar pool) だ。

莉緒 屋根の上に載っているものですね。一時期テレビコマーシャルも、さかんにやっていました。

雅人 構造も簡単で、集熱の働きをするソーラーパネルをつけて水を循環させるだけの装置だ。集熱面は黒色にすれば熱をよく吸収してくれる。構造も簡単なので、結構普及しているんだ。ただ

し、ゼミで取り扱っている再生可能エネルギーには入らないがね。

しのぶ やはり太陽光を直接利用した応用では、太陽電池がいちばん普及しているのですね。

雅人 その通りだね。太陽光を直接電気に変える装置だから、手軽でもある。最近では、多くの家が太陽光パネルを屋根に取り付けている。次回のゼミでは電池を取り上げるので、今日はこまめにして、太陽電池については、次回に取り扱うことにしたいと思う。

第二回ゼミ補講 エネルギーと効率

雅人 今回はゼミの補講として、エネルギーを考えるうえで重要なエネルギー効率の話をしておきたいと思う。

A2. 1. エネルギー保存の法則

雅人 みんなはエネルギー保存の法則は知っているね。

莉緒 正確な定義は分かりませんが、エネルギー保存の法則とは、エネルギーは保存されるので増えも減りもしないという意味かと思います。

雅人 そうだね。言い換えると、エネルギーのかたちは変わっても、その総量は変化しないという法則のことだ。

和昌 ぼくは、高校の物理で習った「力学的エネルギー保存の法則」(law of conservation of mechanical energy) が印象に残っています。

運動エネルギー + 位置エネルギー = 一定
という関係です。数式では

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{一定}$$

となります。物体が運動するときに、その運動エネルギーや位置エネルギーが変化しますが、形態は変わっても、エネルギーの総量は変わらないという法則です。実は、この関係式を使うと、いろいろな物理の問題に対処できたので、便利な式と思っていました。

直道 鉛直方向の運動を考えると、高さ h_1 で速度 v_1 で動いている質量 m の物体が、高さ h_2 で速度 v_2 になったとすると

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

という関係が成立するのでしたね。

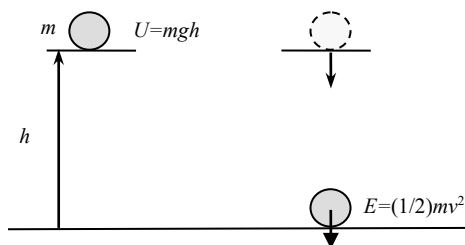


図 A2-1 高さ h にある物体の位置エネルギーは $U=mgh$ 、この高さから自由落下させると、地面 ($h=0$) での運動エネルギー $E=(1/2)mv^2$ はエネルギー保存則から $E=U$ となる。

しのぶ この式を使えば、高さ h から物体を落としたとき、地面 ($h=0$) に到達したときの速度 v は

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{から} \quad v = \sqrt{2gh}$$

と計算できます。これを公式として覚えていました。

A2.2. 使えるエネルギーと使えないエネルギー

雅人 みんな、さすがだな。では、ここで質問だ。エネルギー保存の法則が成立するなら、エネルギーを節約する必要などないはずだが、どうだろうか。

直道 言われてみれば、確かにそうですね。エネルギーのかたちが変わったとしても、その総量が変わらないならば、エネルギーは減りません。

莉緒 確か、**摩擦熱 (friction heat)** と関係があると聞きました。たとえば、ボールを床に落とすと、もとの高さには戻ってきません。床に熱としてエネルギーが散逸するからです。そして、次第にボールの跳ね返る高さは低くなっていき、最後は床に静止してしまいます。

雅人 なるほど。確かにボールの力学的エネルギーは減っていくね。ただし、その場合でもエネルギーのかたちが熱に変わっただけだ。そして、熱もエネルギーのひとつなので、エネルギー保存則は成立しているはずだ。

直道 なるほど。熱エネルギーまで含んで考えると、エネルギー保存則は成立するのですね。でも、それならば、エネルギーを節

約する必要はありませんね。省エネルギー (energy saving) は不要ということでしょうか。

雅人 実は、エネルギーには仕事に有効に変換できるものと、そうでないものがあり

総エネルギー = 有効エネルギー + 無効エネルギー

total energy = available energy + unavailable energy

という関係にある。

和昌 無効エネルギーとは仕事に利用できないエネルギーという意味でしょうか。

雅人 そうなんだ。そして、エネルギーの総量は変化しなくとも、なにか仕事をするたびに有効エネルギーは減っていき、無効エネルギーが増えていくんだ。

莉緒 無効なエネルギーなんてものが、存在するのでしょうか。

雅人 それでは、具体例を紹介してみよう。たとえば、100[°C]のお湯 200[cc]と 50[°C]のお湯 400[cc]では、0[°C]を基準にしたときの熱エネルギーの総量は同じとなる⁹。

しのぶ $(100-0) \times 200 = (50-0) \times 400$ となりますから、確かにそ

⁹ cc は cubic centimeter の略で、cubic は 3 乗という意味がある。centimeter はセンチメートル cm のことで、cc は cm³のことである。

うですね¹⁰。

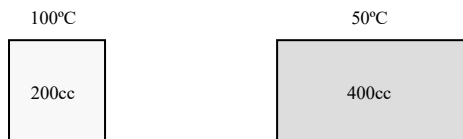


図 A2-2 100[°C] の熱湯 200[cc] と 50[°C] のお湯 400[cc] は (0[°C] を基準とすれば) 同じ熱エネルギーを持っているが、後者ではカップヌードルを調理できない。

雅人 しかし、100[°C] のお湯ならば、カップヌードルを調理できるが、50[°C] のお湯ではそういかない。つまり、同じエネルギーでも有効性が異なることを意味している。

莉緒 そう言われてみれば、なんとなく納得できます。それをきちんと定量的に評価する方法はあるのでしょうか。

雅人 それが、熱力学 (thermodynamics) という学問なんだ。

A2. 3. 熱力学

和昌 熱力学ですか。一年生の必修科目で履修しましたが、内容はほとんど理解できていないと思います。前回のゼミでの先生の説明が分かりやすかったです。

¹⁰ 本来は、熱力学においては、基準点は 0[°C] ではなく、絶対零度 0[K] (−273°C) を基準とすべきである。ここでは、簡単化のため、0[°C] を基準としていることに注意されたい。

雅人 確かに、熱力学は経験則に基づいて構築された要素が多いので、初心者には分かりにくいところもあると思う。しかし、**エネルギー問題 (energy issues)** を考えるときには、とても有用な学問なんだ。

直道 確か、**エントロピー (entropy): S** と**エンタルピー (enthalpy): H** と温度 T のバランスで決まる**自由エネルギー (free energy): G** が重要でしたね。

雅人 それでは、少し復習してみよう。先ほど、総エネルギーは、有効と無効なエネルギーを足したものという話をしたね。実は、総エネルギーに対応するのがエンタルピー: H なんだ。そして、無効エネルギーに関係するのがエントロピー: S となる。そして、有効エネルギーのことを熱力学では**自由エネルギー (free energy): G** とよんでいる。熱力学の構築に貢献した**ギブス (J. W. Gibbs, 1839-1903)** の名前を冠して、ギブスエネルギーとよぶこともある。

直道 そうか。自由エネルギーに G という記号を使うのはギブス Gibbs にちなんでいるのですね。

雅人 ここで、エネルギーの関係をまとめると

$$\text{総エネルギー} = \text{有効エネルギー} + \text{無効エネルギー}$$

となるのだったね。そして、総エネルギーは保存されるが、なにか仕事をする、有効エネルギーが減り、無効エネルギーが増えていくという説明をした。

この関係を熱力学の用語に置き換えると

エンタルピー = 自由エネルギー + 束縛エネルギー

となるんだ。記号で示せば

$$H = G + TS$$

となる。ここで H はエンタルピー、 G は自由エネルギー、 T は温度、 S はエントロピーとなる。

しのぶ つまり、温度 T にエントロピー S をかけた TS が無効エネルギーなのですね。**束縛エネルギー** (bound energy) というのは変な言い方ですね。素直に、無効エネルギーで良いような気がします。

雅人 実際に、そう指摘する研究者もいる。この意味については、後ほど説明する。実は、いろいろな変化においては、自由エネルギー G が重要となる。そこで、先ほどの式を変形して

$$G = H - TS$$

とすることも多いんだ。

ここで、重要なのは、総エネルギー量 H が同じでも、エントロピー S が増えれば、有効利用できる自由エネルギー G がどんどん減っていくということだ。そして、自然のプロセスでは、エントロピーが増えていくことが知られている。これを**エントロピー増大則** (law of increasing entropy) とよんでいる¹¹。

だから、省エネルギーではなく、「**省自由エネルギー**」(saving of free energy) という言い方が正しいことになる。

しのぶ とすれば、エネルギー資源を大切に使うということは正

¹¹ エントロピー増大則を、**熱力学の第二法則** (the second law of thermodynamics) とよんでいる。

しいことなのですね。

雅人 実は、ここで重要な鍵を握っているのが熱エネルギーなんだ。みんなは **熱力学の第一法則** (the first law of thermodynamics) という言葉を聞いたことがあるかな。

莉緒 確か、第一法則は、**内部エネルギー** (internal energy) が出てきた時点で、分からなくなりました。

A2.4. 熱と気体

雅人 熱力学の第一法則というのは、熱力学版のエネルギー保存の法則に相当する。前回のゼミで、熱をエネルギーとして認識するために、気体の膨張を利用した仕事を紹介したね。そのとき

$$\Delta Q = p\Delta V$$

という式は、正式には

$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$$

とする必要があることも紹介した。実は、これが熱力学の第一法則だ。 W を仕事として

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

と表記する場合もある。その意味は

系に加えた熱 = 内部エネルギーの増加 + 外にした仕事となる。つまり、系に熱 ΔQ を加えると、その一部は、外部に対して、 $\Delta W = p\Delta V$ だけの仕事をし、残りは**内部エネルギー** ΔU として系に蓄えられるというものである。

莉緒 この内部エネルギーというのがよく分からなかったです。

雅人 そうだね。それでは、気体で考えてみよう。気体に熱を加えると膨張する。それを利用すればピストンを動かすことができ、熱を利用して仕事ができるということを前に説明したね。ところが、加えた熱がすべて気体の膨張に使われるかというのと、そうではないんだ。一部は気体分子のエネルギーを上げることに使われる。これが内部に蓄積されると考えて内部エネルギーとよんでいる。

しのぶ まだ、しっかりと来ません。

雅人 気体に熱を加えると、気体分子の運動が活発になる。しかし、分子の運動には**並進運動** (translational motion) だけでなく**回転運動** (rotation) や、**多原子分子** (polyatomic molecule) ならば**原子間振動** (vibration) もある。そして、これらの運動のうち、回転と振動には方向性がない。よって、加熱による気体分子の運動が、すべて気体の膨張に寄与するわけではないんだ。

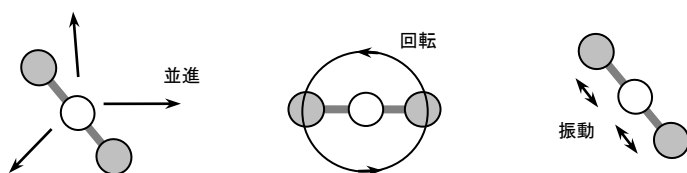


図 A2-3 多原子分子の運動には並進、回転、振動がある。回転と振動は気体の膨張には寄与しない。

和昌 気体の膨張に寄与しない気体分子の運動があるのですね。

確かに、回転や振動は膨張にはまったく寄与しませんね。

雅人 そこで、これらを束縛エネルギーともよんでいる。気体分子に束縛されて、外部への仕事には使われないという意味となる。

直道 そう言われれば、確かにそうですね。

雅人 実は、内部エネルギーは計算することができるんだ。

莉緒 本当ですか。どのようにすればよいのですか。

雅人 気体の比熱には **定積比熱** (specific heat under constant volume): C_v と **定圧比熱** (specific heat under constant pressure): C_p の 2 種類があり

$$\Delta Q = C_v \Delta T \quad (\text{体積 } v \text{ が一定})$$

と

$$\Delta Q = C_p \Delta T \quad (\text{圧力 } p \text{ が一定})$$

となる。

定積比熱とは、体積を一定に保ったまま、気体に熱を加えたときに、温度がどれくらい上昇するかという指標となる。一方、定圧比熱とは、圧力を一定のときの比熱だ。また、気体の場合には $1[\text{mol}]$ を単位量とするから、**モル比熱** (molar specific heat) とよんでいる。

和昌 とすると、体積一定の状態での温度上昇が内部エネルギー U に相当するのですね。

雅人 そうだね。それを表記すると

$$\Delta U = C_v \Delta T \quad \Delta Q = \Delta U + p \Delta V = C_p \Delta T$$

となる。

しのぶ とすれば

$$p \Delta V = C_p \Delta T - \Delta U$$

から

$$p \Delta V = (C_p - C_v) \Delta T$$

という関係式も導出できます。

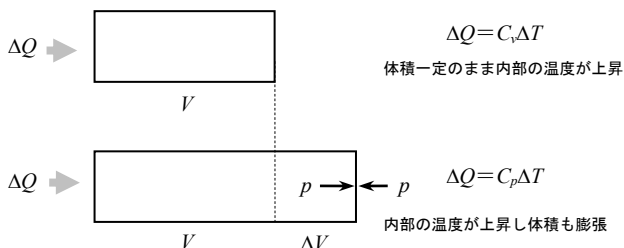


図 A2-4 体積一定のまま熱を加えたときの温度上昇率と、圧力一定下で気体が膨張する状態での温度上昇率は異なる。気体を 1[mol]としたときの比例定数をそれぞれ、モル定積比熱 C_v とモル定圧比熱 C_p とよんでいる。定圧比熱は、定積比熱よりも常に大きい。

雅人 その通り。実は、気体の $C_p - C_v$ の値は決まっていて、常に気体定数の R

$$C_p - C_v = R$$

となる。これをマイヤーの関係式 (Mayer's relation) とよんでいる。この結果を、しのぶさんの最後の式に代入すればどうなる。

しのぶ $p\Delta V = R\Delta T$ となります。

直道 そうか、これは $pV = RT$ という 1[mol] の気体の状態方程式において、温度変化 ΔT と体積変化 ΔV の対応を示したものなのですね。さらに、 $p\Delta V$ は、気体のする仕事に相当します。

雅人 そして、これが 1 [mol] の気体ができる仕事の最大値となる。そして、残りの $\Delta U = C_v\Delta T$ が内部エネルギーとなる。

莉緒 なるほど。定積比熱 C_v が分かれば、内部エネルギーが計算できるのでね。また、 C_v に R を足せば定圧比熱 C_p も得られる。

雅人 そういうことになる。そして、気体を利用する限り、熱エネルギーを 100% 力学的エネルギーに変換することはできないことを意味している。内部エネルギーは力学的仕事をしないからね。

和昌 つまり有効エネルギーは、気体 1[mol] あたり RT ということになるのですね。

雅人 そういうことになる。そして、熱エネルギーを、気体を介して力学的エネルギーに変換するときに、もっとも効率がよいのは単原子分子 (monoatomic molecule) からなる気体となる。

莉緒 単原子分子とは、不活性ガス (inert gas) のヘリウム (helium) He、ネオン (neon) Ne、アルゴン (argon) Ar などですね。これらは、安定な原子構造をしているので、原子単独で安定であるため、1 原子の気体として存在できるのでした。

雅人 クリプトン (krypton) Kr やキセノン (xenon) Xe などもあるだね。これらの元素は不活性元素や希ガス (rare gas) とよばれることもある。

A2.5. 運動の自由度

しのぶ 先生、どうして単原子分子の気体が有利なのでしょう。内部エネルギーが低いということですか。

雅人 その通りなんだ。原子数が増えると、いろいろな運動が加わって、内部エネルギーも高くなる。それを見ていこう。

まず、単原子分子の運動は並進運動しかない。3次元空間 (three dimensional space) では x, y, z の3方向に運動ができる。逆の視点でみれば (x, y, z) の3個の変数が分かれば、粒子の位置を指定できることになる。これを自由度 (degree of freedom) とよんでいる。つまり、単原子分子の自由度は3となる。

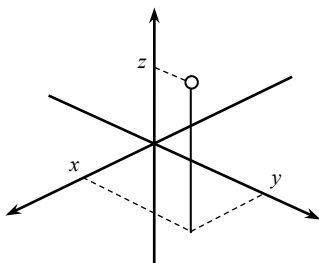


図 A2-5 単原子分子の位置を3次元空間で指定するためには3個の変数が必要となる。これを自由度3とよぶ。

直道 なるほど、原子 1 個の運動ならば確かに並進運動だけですね。

雅人 そして、ミクロの世界では、温度 T では、自由度 1 個あたり $(1/2)kT$ のエネルギーを粒子が有することが分かっている¹²。ちなみに k はすでに求めたボルツマン定数である。よって、1[mol] では、1 自由度あたり $(1/2)RT$ のエネルギーを有することになる。単原子分子つまり 1 個の原子の自由度は 3 だから、その内部エネルギーは $(3/2)RT$ と与えられることになる。

和昌 つまり、単原子分子気体 1[mol] の内部エネルギーは $(3/2)RT$ となり、その定積比熱は $C_v = (3/2)R$ と与えられるのですね。とすれば、 $C_p = (5/2)R = 2.5R$ となります。しかも、これは気体の種類には関係なく成立する関係です。

雅人 その通り。実際のデータを表 A2-1 に示している。みごとに理論値と、ほぼ同じ値が得られているね。

表 A2-1 希ガスの定圧比熱

	C_p (J/mol·K)	C_p/R
He	20.9	2.51
Ne	20.8	2.51
Ar	20.9	2.51

¹² ミクロ粒子が 1 自由度あたり $(1/2)kT$ のエネルギーを有するという説明は、拙著『なるほど熱力学』『なるほど統計力学—応用編』（海鳴社）を参照いただきたい。

莉緒 これだけ理論と実験が一致するというのは驚きですね。もちろん、定積比熱は $1.5R$ となるのですね。それでは、2 原子分子 (diatomic molecule) や 3 原子分子 (triatomic molecule) の比熱も計算できるのでしょうか。

雅人 もちろんだ。ただし、正式には統計力学 (statistical mechanics) という学問が必要になるので、ここでは、概略を紹介することにする。例として 2 原子分子の自由度を考えてみよう。あらためて、自由度とは、3 次元空間 (three dimensional space) で、位置を指定するために、変数が何個必要かということに対応している。

直道 それでは、僕が挑戦してみます。原子 1 と原子 2 からなる分子を考えてみます。まず、原子 1 の位置を決めるためには、 (x_1, y_1, z_1) の 3 個の座標が必要なので、自由度は 3 です。つぎに、さらに原子 2 の位置を決めるのにも (x_2, y_2, z_2) の 3 個の座標が必要となります。とすると、自由度は 6 ではないでしょうか。単純すぎますか。

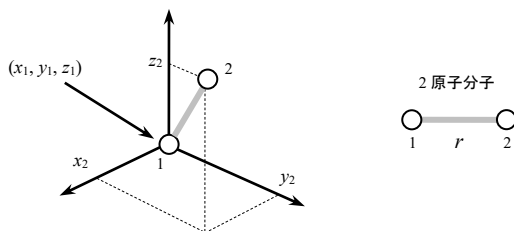


図 A2-6 2 原子分子の自由度。3 次元空間では 6 個の変数が必要となるので自由度は 6。腕の長さ r が不変の場合には、自由度は 5 となる。

雅人 いや、そんなことはないよ。2 原子分子の自由度は 6 で正解だ。この自由度は、3 種類の並進運動の他に、2 種類の回転運動ならびに 1 種類の原子間振動に由来している。

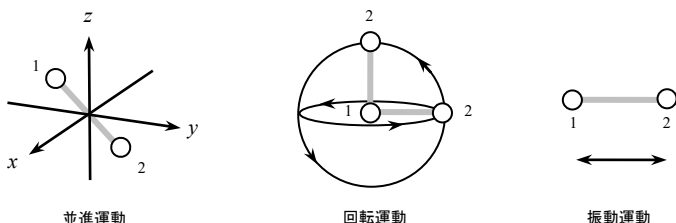


図 A2-7 2 原子分子の運動: 3 種類の並進運動と 2 種類の回転運動と 1 種類の振動がある。

雅人 ここで質問だ。もし原子間距離つまり分子の腕の長さが r と一定だったらどうなるだろう。

しのぶ そのときは自由度が 1 個減るので 5 ではないでしょうか。

雅人 正解。それでは、あらためて 2 原子からなる気体分子の定積比熱はどうなるかな。

和昌 自由度が 6 なので、 $6 \times (1/2)R$ から $3R$ となります。

雅人 その通り。ところが、実測値は $(5/2)R$ に近い値を示すことが分かっている。つまり、自由度は 6 ではなく 5 となるんだ。そして、この原因は、原子間距離 r が変化しないこととされている。

莉緒 原子間距離 r が変化するということは、2 原子が振動しているということですね。とすれば、距離 r が一定ということは、振動しないということなのですね。

雅人 そうなんだ。もちろん、原理的には、2 原子が振動することもある。ただし、そのためには 1000 [°C] を超えるような高い熱エネルギーが必要と言われている。

実は、ミクロ粒子の振動は調和振動 (harmonic oscillation) で近似できる。量子力学 (quantum mechanics) で、そのシュレーディンガー方程式 (Schrödinger's equation) を解くと、基底状態 (ground state) と励起状態 (excited state) の間にエネルギーギャップ (energy gap) があることが知られている¹³。つまり、2 原子分子が振動するためには、ギャップ以上の大きなエネルギーを与えないといけない。常温近傍の温度域では振動が起きないということになる。

しのぶ なるほど、そういうことなのですね。調和振動子の方程式は、自分でも解いたことがあるので、よく分かります。振動モードが量子化 (quantization) されるのでしたね。

雅人 ここで、自由度と回転運動を関係付けるために図 A2-8 の球座標 (spherical coordinates) を使って考えてみよう。

¹³ 調和振動子の量子力学的な取り扱いについて知りたいひとは、村上雅人著『なるほど量子力学 II』(海鳴社)を参照されたい。

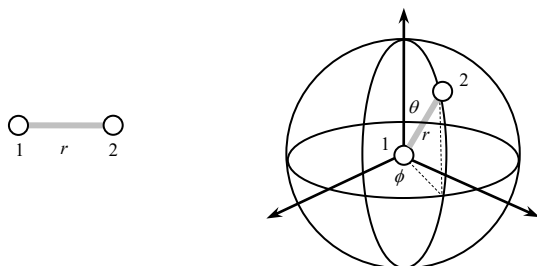


図 A2-8 球座標における 2 原子分子の運動

まず原子 1 が球座標の中心にあるとしよう。ただし、中心位置を決めるのに (x, y, z) 座標が必要だから、この操作に自由度が 3 個ある。つぎに、 r が変化するとき振動があるが、ここは振動がなく r は一定としよう。すると、原子 2 は半径 r の球面上を動くことができる。この球面上の位置を決めるためには、ちょうど地球の緯度 (latitude): $(\pi/2) - \theta$ と経度 (longitude) ϕ に相当する角度を決めればよいことになる。つまり、自由度が 2 となることを示している。

一方、回転という観点でみると、図 A2-9 に示すように緯度固定の回転と、経度固定の回転の 2 種類があることが分かる。

和昌 なるほど、球座標にすれば分かりやすいですね。まず半径 r の変化が振動モードに対応し、緯度と経度が 2 種類の回転モードに対応する。ところで、球座標の θ は緯度には対応していないようなのですが。

雅人 そうだね。球座標では、 θ は北極からの角度を取っている。

これを天頂角 (zenith angle) とよんでいる。一方、地球の緯度 λ は赤道からの角度となる。そのため $\lambda = \pi/2 - \theta$ という関係にある。

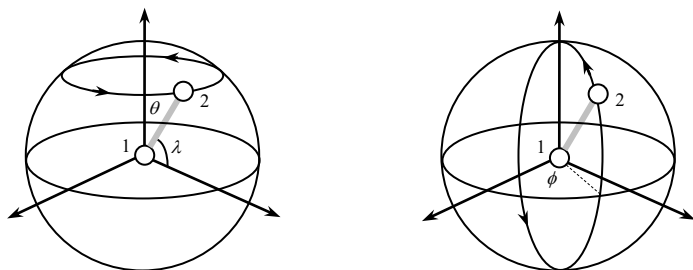


図 A2-9 緯度を固定した場合と、経度を固定した場合の回転モード

直道 僕は地球で慣れているから、緯度と経度のほうが分かりやすいですね。

雅人 緯度と同じにすると、北半球と南半球では＋と－になってしまう。ところが天頂角ならば 0 から π で全地球をカバーできるので、数学的には、こちらが便利なんだ。

莉緒 なるほど、そういうことなのですね。

和昌 先生。理論的な背景は分かりましたが、実際の 2 原子分子の定圧比熱はどうなのでしょう。

雅人 それでは、代表的な気体のデータを表 A2-2 に示そう。どうだい、理論値とよく合っているだろう。

表 A2-2 2 原子分子気体の定圧比熱

	C_p (J/mol·K)	C_p/R
N ₂	29.1	3.50
O ₂	29.5	3.55
CO	29.1	3.50

直道 いまの計算では、2 原子分子の運動の自由度は 5 だから $C_v = (5/2)R$ となります。したがって、 $C_p = (7/2)R = 3.5R$ が理論値となります。確かに、見事に理論値と実験値が合っていますね。

しのぶ 原子数が 2 よりも多い分子についても同様に考えていけばよいですね。

雅人 基本的にはそうだね。いずれ、気体分子においては、内部エネルギーの増加に熱エネルギーが使われるため、100% の仕事ができないんだ。

莉緒 これまでの議論を踏まえると、熱を仕事に変換できる効率

$$\eta = \frac{C_p - C_v}{C_p} = \frac{R}{C_p}$$

となるのではないだろうか。

雅人 いいところに気付いたね。

直道 とすると、単原子分子の気体を利用した場合の効率は

$$\eta = R/(5/2)R = 2/5 = 0.4$$

となりますね。つぎに2原子分子では

$$\eta = R/(7/2)R = 2/7 = 0.29$$

と原子数が増えるにつれて低くなっていきます。先生が、単原子分子からなる気体を媒介するのがもっとも効率が高いと言われていたのは、このことだったのですね。

雅人 そういうことだね。

和昌 でも、これでは効率が悪すぎませんか。半分以上のエネルギーを無駄にしていますよね。

A2.6. 熱機関の効率

雅人 実は、熱機関では、温度上昇によって増加した内部エネルギー ΔU を、冷やすことによって、もとの始状態 $\Delta U=0$ まで戻している。この操作は、ピストンエンジンを繰り返して作動させるために必要となるのだが、その結果、 ΔU はエンジンのトータルの効率には関係がなくなるんだ¹⁴。

莉緒 それでは、エンジンの効率はどのように与えられるのでしょうか。

¹⁴ 実際の熱機関では、内部エネルギーを利用して別方式の出力に再利用しているので、その熱は無駄になっていない。

雅人 まず、仕事をさせるためには温度差が必要になる。それが基本だ。気体の状態方程式 $pV=nRT$ においても $p\Delta V=nR\Delta T$ となつて、温度差がなければ、この式は 0 となり、 $\Delta W=p\Delta V=0$ となる。しかも温度差が大きいほど、取り出せる仕事も大きくなる。このとき、熱機関の効率は

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

と与えられる。高温が T_H 、低温が T_L だ。さらに温度 T の単位は絶対温度 (absolute temperature) の K である。

しのぶ そうしますと、室温が 20[°C] とし、気体の温度を 100 [°C] まで上げて仕事を取り出したとすると、絶対温度では各々 293[K] と 373[K] となりますから

$$\eta = \frac{373 - 293}{373} \cong 0.21$$

となつて、熱機関の効率は、たったの 21% なのですね。

雅人 実は、火力発電所でも効率が問題となっていた。そのためには、たとえば加熱する気体の温度を 500 [°C] まで上げたいとしよう。実際に、火力発電所では、水を高圧の蒸気にして、この温度まで上げて、蒸気タービン (steam turbine) を廻して発電している。そのためには、500 [°C] という高温に長期に耐える材料がないと意味がない。

直道 500 [°C] は 773 [K] ですから、効率は

$$\eta = \frac{773 - 293}{773} \cong 0.62$$

となり、62% となりますね。

雅人 これは理論的な最大値で、実際の火力発電所は 40% 程度なのが現状だ。これは、鉄鋼の耐熱温度によって 500 [°C] 以下で運転せざるをえないためだ。そこで、より高温で使える鉄鋼材料の研究開発がさかんに行われた時代もあり、いまの蒸気タービンは 600 [°C] での運転に耐えることができる。

和昌 結構、難しいですね。効率を上げようとする、高温高压に耐える材料がないといけないということですね。しかし、600 [°C] に耐える鉄鋼材料とは、どんなものなのでしょう。

雅人 鉄の融点は 1535 [°C] だから、600 [°C] なら大丈夫そうだが、タービンは高速回転するから、常に遠心力が働く。さらに、高温では鉄であっても、あたかもアメのように変形することがある。これをクリープ (creep) とよんでいる。これらに耐える材料として 12Cr 鋼が開発されている。約 12% のクロミウム (chromium) Cr を含む鉄合金 (Fe-12Cr) のことだ。

莉緒 その開発競争もすごかったのでしょうかね。

雅人 火力発電所は世界中にあるから、効率を少し上げるだけで、莫大な燃料コストの節約になる。だから、世界中で耐熱材料が研究されていた時代もあったんだ。

材料研究では、日本は常に世界のトップを走っている。その貢献も大きいと思うよ。

直道 高温ほど、燃料効率が上がるのであれば、もっと高温にすることはできないのでしょうか。

雅人 実は、それが可能なんだ。主に LNG 火力発電所で使われている技術なんだが、みんなはジェットエンジン (jet engine) は知っているね。

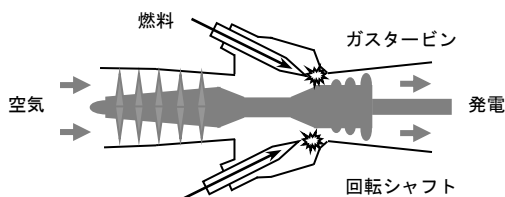


図 A2-10 ジェットエンジンを利用したガスタービン発電: 効率が飛躍的に向上する。

しのぶ はい、ジェット機の推進に使われています。いまでは、マッハを超えるスピードも出せるので、飛行時間が短縮されたと聞きました。

雅人 その技術を応用した火力発電もある。こちらでは、水蒸気ではなく、航空機と同じように空気を圧縮した気体を利用してタービンを廻している。ガスタービン (gas turbine) とよばれている。この航空機用のジェットエンジンを発電に応用しようというものなんだ。

莉緒 それはすごい技術ですね。確かに空を飛ぶなら、空気を気体として利用するしかないですね。そのうえで、航空機の推進機構を火力発電所のタービン回転に利用するというのはまさにハイテクですね。

雅人 ジェットエンジンで使う圧縮空気の温度は 1600[°C] にも達する。

和昌 それは、すごいですね。単純計算では、1600[°C] は 1873[K] だから

$$\eta = \frac{1873 - 293}{1873} \cong 0.84$$

となり、なんと 84% となります。

雅人 残念ながら、発電所全体での効率は 65% と言われている。

しのぶ それでも、すごい効率ですね。ここで質問です。先生は火力発電所では水蒸気の温度を高くすれば効率も上がるが、鉄鋼の耐熱温度のため 500[°C] 前後で運転していると言われていました。1600[°C] に耐える材料はあるのでしょうか。

雅人 ジェット推進用のエンジンが開発されているのだから、もちろんだ。ただし、鉄ではなく、ニッケル (nickel) Ni をベースとした超耐熱合金 (super heat-resistant alloy) だ。

和昌 値段は高そうですね。

雅人 もちろんだが、LNG 発電の効率が上がれば燃料費の節約につながる。LNG や石油が安ければ別だが、かなり値段も高くなっている。だから、少々高い材料を使ってでも効率が上がれば十分ペイする。なにより、貴重な化石燃料の節約ができるというのは、とても重要な技術となる。

莉緒 いずれ、電気は2次エネルギーで、それをつくるときには、かなりの1次エネルギーの損失を生じるのですね。そのことを忘れて、電気自動車を礼賛するのは、かなり問題ですね。世界は、どうなっているのでしょうか。

雅人 ひとつは、原子力発電に大きな期待をかけていたことにある。なにしろ夢のエネルギーで CO₂ も排出しない。しかし、いったん事故が起これば放射能汚染に見舞われ、被災地はひとの住めない場所となる。本格的な復興は厳しい状況になってしまった。

しのぶ そこで登場するのが再生可能エネルギーなのですね。

雅人 そうなんだ。たとえば、米国のカリフォルニア州では ZEV (zero emission vehicle) とよんで、電気自動車に供給する電気は風力や太陽光のような再生可能エネルギーでなければならないという規制をかけるところもある。電気を火力などでつくったのでは CO₂ を排出するから意味がないということだね。

しのぶ 世界中が電気自動車となれば、必要な電力は、いまの数倍になると聞いたことがあります。再生可能エネルギーだけで賄えるのでしょうか。

雅人 それは、無理だね。カリフォルニアの ZEV も 100% 再生可能エネルギーからトーンダウンしている。

和昌 資源が枯渇する化石エネルギーから、再生可能エネルギーへのシフトはよいことと思いますが、性急な変化は、世界に混乱を与えるのではないのでしょうか。

雅人 わたしも、そう思うよ。だから、化石燃料をうまく使いつつ、省エネルギーを進め、時間をかけて再生可能エネルギーへとシフトするのが賢明だと思う。

直道 でも、いまの世の中では CO₂ 排出は絶対な悪とみなされているので、バイオマスもバイオエタノールも無理ですね。

雅人 だからこそ、きちんとした科学知識に基づいた議論が必要だと思う。特に、みんなは将来を担う世代なのだから、そこを真剣に検討してほしい。

学生自主ゼミ 2

和昌 これから村上ゼミ「再生可能エネルギー」の振り返りを実施したいと思います。今日は、わたしが司会役を務めますので、よろしくお願いします。それでは、順にゼミの感想を話していただけますか。

直道 最近、環境にやさしく、CO₂を排出しないクリーンなエネルギー源として、再生可能エネルギーが注目されていますが、その定義があいまいでした。まず、石油、石炭、天然ガスやウランは資源が限られているため、再生可能エネルギーではないこと、そして、太陽、風力、水力、波力や地熱など地球がある限り枯渇しないエネルギー源が再生可能エネルギーであることが分かりました。さらに、バイオマスは生物由来の資源であり、地球が存続する限り、植物も動物も、つぎつぎと成長するので、これらも再生可能エネルギー源とみなせることも納得しました。

しのぶ わたしは、水力発電が再生可能エネルギーと言われて、新鮮な驚きを覚えました。確かに、水力発電用のダムは、川を堰き止めてつくられています。太陽の恵みをうけて空気中の水分が上昇気流となって上空に達して雨となって山地に降り注ぎ、それが川となって海に流れ込んでいます。この営みは地球と太陽がある限り、永続しますから、まさに再生可能エネルギーなのですね。さらに、理論的なエネルギー変換効率が 100% と聞いて、すぐれた発電方式と思いました。残念ながら、立地場所が限られている

ことや、エネルギー密度が低いために、日本では、頭打ちとなっているのですね。

和昌 水力発電と言えば、田舎の川などに設置する小型のマイクロ水力発電が面白いし、有用なのかなと思いました。夜と昼の電力使用の負荷平準化のために設置された揚水発電は、すごい発想と思いました。昼に落下させた水を、夜の電力を利用してもとに戻すということは言われてみれば分かりますが、なかなか思いつきません。

莉緒 わたしは、ずっと風力発電のことが気になっていました。自然風を使うのだから、とてもよい発電方式と思っていたのですが、課題も多いことが分かりました。最近も、ある民間企業が巨大な風力発電機を 60 台、山中に建設するという計画を発表して、地元の住民が反対しているというニュースを見ました。自然エネルギーの普及と銘打ちながら、自然破壊を進めているのは矛盾に思います。

また、風力発電は風が吹かないと発電できないので、安定電源にはなりえないという指摘も、その通りと思いました。よって、風力のような自然エネルギーを有効利用するためには、なんらかのエネルギー貯蔵装置との組み合わせが重要と思います。でも、日本のように台風が多い国で、風力発電機が強風に耐えられるかが心配です。先生は、ドイツでは台風もなく、さらに安定な風が定常的に吹いているので、風力発電には好立地と言われていましたが、やはり、地域や国によって適した発電方式があると思います。ヨーロッパで風力がうまくいっているからといって、それを日本にも大々的に導入するというのは疑問に思います。

さらに、先生がおっしゃっていたエネルギーの地産地消は、とても重要なアイデアではないでしょうか。それほど大型のものでなく、自然を利用したエネルギー源で日々の電力を自ら賄う、この方式が今後求められているのかなと思います。

和昌 まず、基本として化石燃料はいずれ枯渇するので、世界の持続的発展のためには、枯渇しないエネルギーをうまく利用するという考えはとても重要と思います。

僕の田舎には地熱発電所があるので、この発電方式にとっても興味があります。もちろん、効率はあまり高くないですが、一度、地下の地熱貯留層さえ発見できれば、低コストで発電が持続可能なのですから将来有望と思いました。地熱発電所のある温泉地は国立公園が多いので、開発が難しいという話でしたが、人類の将来がかかっているのですから、火山国日本としては、国を挙げて積極的に取り組むべき技術開発と思います。

直道 バイオマス発電については、CO₂を排出しないという宣伝文句がありますが、正しくは、**カーボンニュートラル** (carbon neutral) だったのですね。つまり、大気中にあった CO₂を植物が吸収したものだから、それを大気に戻しても CO₂の実質的な上昇が生じない、だからニュートラルだという考えだと知り、少し驚きました。

それを言うならば、もともと石油や石炭などの化石燃料は、すべて大気中の CO₂を生物が体内に取り入れたものが化石となったものなのだから、これらを燃やしてもカーボンニュートラルということになってしまいます。

しのぶ 炭酸飲料の泡が CO₂ だということを「低炭素社会」ゼミで知りましたが、このときも、大気中にある CO₂ を使っているので、それを放出してもカーボンニュートラルだから問題ないという主張だったと思います。バイオマスもカーボンニュートラルだから、燃やして CO₂ を放出しても構わないという考えですが、わたしは賛成できません。なぜなら、CO₂ 量を増やしていることに変わらないからです。

もし本当に CO₂ を削減したいのならば、バイオマスも燃やすのではなく、水分などを飛ばして保存するというのが賢いと思いました。その点、日本が世界に誇る木造建築は、炭素固定の素晴らしい技術だと思います。なにしろ木材の 50% が炭素 C です。何百年も寺院などの建築資材として保持されているのですから、環境にやさしく、コストもかからない優れた炭素固定ですよ。ものすごいお金をかけて、CO₂ を高圧で圧縮して海や地中に保存するという技術よりも、はるかに優れていると思いました。

莉緒 日本政府をはじめとして、世界各国は自然現象に依存する再生可能エネルギーへの大転換を進めようとしています。しかし、これらのエネルギーは気まぐれなエネルギー源です。たとえば、風が吹かなければ風力で発電することはできません。太陽電池も日が照っていなければ発電できません。これでは、基幹の安定な電力網として使えないのではないのでしょうか。もし、停電が起きたら社会インフラや産業が壊滅してしまいます。

しのぶ その点、ヨーロッパは風力発電で大成功していると聞いていたのですが、実際は、ドイツにおいても風力の割合は 20% 程度なのですね。総電力消費量に占める再生可能エネルギーの割合

は60%と高いですが、一方で、質の悪い褐炭を使った石炭火力が16%にもなっています。けっして、環境にやさしい国ではないなと思いました。

和昌 ドイツは素晴らしい、自然エネルギー大国だと聞いていましたが、SO_x（ソックス：硫黄酸化物；SO₂やSO₃）やNO_x（ノックス：窒素酸化物；NO、NO₂、N₂O₄、N₂O₃、N₂O）などの環境汚染物質を排出する低品質の石炭を使っていたのでは意味がないですね。それとメルケルとプーチンが共同会見をして、天然ガスのパイプラインをロシアからドイツに引くという話も聞きました。ドイツは自然エネルギー100%を目指すグリーンな国というイメージがありましたが、がっかりです。先生が言うように、国際社会では自国に有利に働くような駆け引きがあって、各国のリーダーたちの発言を額面どおりに受け止めてはいけないなと思いました。やはり、自分たちで真実を見つめる目を養うことが、とても重要ですね。

莉緒 水力発電ではダムに水さえあれば連続運転できますし、出力が調整できるので素晴らしい再生可能エネルギーですが、日本では、もう立地がないのが残念です。脱ダム宣言を聞いたときは、とても素晴らしいと思いました。「コンクリートから人へ」という標語には誰も反対できません。でも、世の中の事情をエネルギー問題も含めて俯瞰的に見た場合、それが、本当に正しい選択だったかを見つめ直す必要があると感じています。

直道 とは言え、化石燃料など資源に限りがあるエネルギー源から再生可能エネルギーへとシフトすること自体は、間違いがない

選択と思います。

しのぶ その点、燃料節約の意味でもエネルギー効率を高めることは、とても重要と思いました。化石燃料を燃やしてエネルギーを得る場合の効率が、温度差だけで決まっているということも驚きでした。つぎの単純な式ですね。

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} \quad T_H : \text{高温} ; T_L : \text{低温}$$

分かりやすいですが、そんなに単純でよいのかと、ちょっとした驚きでした。

莉緒 火力発電所では、材料の耐熱性のために、発電のときの温度を上げられないので効率は40%程度でした。ところが、ジェットエンジンに使われるガスタービンを使うと、温度が1600℃まで上げられ、効率が84%まで上昇するというのですから、すごい技術だと思いました。もちろん、このような高温に耐えることのできる高価な超耐熱材料は使いますが、資源に限りある化石燃料を有効に使うということは、とても重要ですから、将来に向けて有望な技術と思いました。

和昌 確かに、エネルギー効率を上げるという研究開発は、とても重要ですね。一方で、やはり枯渇しないエネルギーを利用することも重要だと思いました。ただし、再生可能エネルギーは安定しないので、先生がおっしゃるように、何らかのエネルギー貯蔵技術との組合せは必須と思います。

この貯蔵技術として、いま電池が大きな注目を集めています。次回のゼミのテーマは「電池」と聞いています。電池は中学や高

校の理科で習いましたが、その最近の進展について学べると、期待しています。可能であれば、中学校時代に習った電池の復習をしてきてください。

自主ゼミ2「再生可能エネルギー」のまとめ

1 再生可能エネルギーとは

- ・資源が枯渇しない自然のエネルギー

水力、風力、海洋力、太陽光、地熱、バイオマスなど。

2 水力発電

- ・川などを堰き止めてダムとし、貯めた水が落下するエネルギーを利用して発電。
- ・理論的には変換効率が100%
- ・エネルギーの出力と停止が簡単にできる。
- ・ただし、雨が降らないとエネルギーが貯められない。
- ・立地条件が厳しい→日本では、今後、ダムの新設が難しい。
- ・後進国では有望
- ・複数の国を流れる川では、上流国のダム建設が紛争問題。

2.1. 揚水発電

- ・電力貯蔵に利用可
- ・夜間電力を利用して揚水し、昼間に送電。

2.2. マイクロ水力発電

- ・小川などに水車を設置し、その回転で発電。
- ・地産地消に向いている。

3 風力発電

- ・ 風が吹けば風車が回り、その回転力で発電。
- ・ 無風では発電ゼロ
- ・ 台風など強風に対する対策が必要

4 地熱発電

- ・ 地球内部の温度、つまり地熱を利用した発電。
- ・ 地球の中心温度は 6000°C
- ・ 地表近くのマグマ溜り → 地下に地熱貯留層がある。
- ・ 貯留層の熱水や水蒸気を利用して発電 → 燃料不要
- ・ 地熱貯留層の探索が課題 → 高コスト

5 バイオマス発電

- ・ バイオマスとは植物、動物を含めた生物由来の資源。
→ その種類はたくさんある。
- ・ かつて廃棄されていたバイオマスを燃料として有効利用
- ・ バイオマスを燃やせば CO_2 が発生する。
- ・ バイオマスは燃やさず、乾燥して保存すれば炭素固定が可能。
- ・ 木材の 50%が C

6 再生可能エネルギーは資源が枯渇しない

- ・ ただし、エネルギー供給が安定しない。
→ 風力は風が必要、太陽光は日射が必要（夜は発電しない）。
- ・ なんらかのエネルギー貯蔵技術が必要 → 電池？