はじめに

エネルギー問題を論じることの重要性を否定する者はいないだろう．しかし，具体的に何が問題なのかと問われると，答えに窮する人は多いに違いない．問題の正体が掴めないと，その解決策の妥当性をも見誤ってしまう．本書は，エネルギー問題の本質を考えるための切り口を提示する目的で書かれたものである．その内容は，エネルギーに関する基本的事項に始まり，人類とエネルギーとの関わりの歴史を振り返り，今後のエネルギー確保についての議論に至るまで，幅広く網羅したつもりである．

経済との関連からエネルギー問題を考えるとき，多くの人は，「エネルギーの稀少性」を懸念事項に挙げるだろう．しかし，エネルギーが稀少化するとは，いったいどのような意味なのだろうか．物理学を少しでも学んだ経験がある者なら，「エネルギー保存則」を知っているはずである．この法則に従えば，エネルギーはいろいろな形態を取り得るものの，全体としての総量は保存されることになる．つまり，エネルギーは生成もしなければ消滅もしないのである．ではなぜ，エネルギーの稀少化が問題なのか．私の経験からすると，これに即答できる人は意外と少ない．だが，このあたりの議論を踏まえなければ，エネルギー論は曖昧なまま進んでしまう恐れがある．この手の議論には熱力学的な視点が不可欠であるが，本書では，数理モデルの使用は最小限に留めたつもりである．

第１章と第２章でエネルギーに関する退屈だが重要な基本的事項を踏まえたあと，第３章では，人類の「エネルギー史」についてまとめている．狩猟採集時代から現在までの長い歴史を振り返ると，そのほとんどの年月を，人類はバイオマスエネルギーに頼って生きてきた．何よりも重要なエネルギー資源といえば，まずは食料であり，食料の獲得競争に敗れた者は子孫を残すことを諦めなければならなかった．このことは，人間のみならず，他の動物についても同じである．しかし，ただ単に食料が獲得できればよい，というわけでもない．

何をするにしても，エネルギーが要る．したがって，食料を獲得するためにもエネルギーを必要とする．もしも，食料獲得のために費やしたエネルギーよりも，獲得した食料から得られるエネルギーの方が少なければ，その個体は生き残ることができないのである．

当然，効率よくエネルギーを獲得できるような能力を身につけた個体ほど，より多くの子孫を残す傾向があったはずだ．そうした自然淘汰を経て，年月を追うごとに，1 個体当たりの平均的なエネルギー消費量は増加してきたはずであると，我々は考えたいところである．ところが，バイオマス社会においては，そのような「繁栄」を抑制するブレーキが強く働いていた．第 3 章では，そのメカニズムについて議論する．

さて，人類は長いバイオマス時代を経て，ようやく本格的な化石燃料時代に突入した．その節目こそが産業革命であるのだが，それが始まったのはせいぜい 2 世紀ほど前であり，人類史からすれば，ほんのつい最近の出来事にすぎない．化石燃料時代の前半は，石炭が主役だった．もっとも，石炭はずっと以前から使われていた．しかし，石炭の力で石炭を産出し，石炭の力で石炭を遠くに運び，石炭の力で石炭経済を増殖させていくという，石炭文明の自己拡大的な性質は，蒸気機関の普及により完成していったのである．それ以降，石炭の消費は加速度的に増えていった．

石炭は枯渇性資源であり，消費し続ければ，いずれは無くなる．しかし，石炭が物理的に無くなるという状況よりもずっと早くに，石炭社会は，安価で質の良い石炭の稀少性という問題に直面する．採掘が容易で質の良い石炭ほど先に採掘されるという，資源利用の一般的傾向のためである．19 世紀の経済学者 W.S. ジェヴォンズ（1835–1882）は，石炭経済の繁栄は長続きしないと警告した．しかし幸いなことに，我々には石油があった．石炭と蒸気機関が作り上げた経済的繁栄は，石油と内燃機関によって引き継がれた．そしてその後 1 世紀以上にわたって，我々は石油文明を生きてきた．第 4 章では，化石燃料時代の歴史的経緯についてより詳しく論じている．

化石燃料時代の特徴は，バイオマス時代と比べて急激な人口増加をもたらした，ということだけではない．もうひとつ見逃してはならないのは，1 人当た

りのエネルギー消費量が急増したことである．これら２つの要因が重なって，産業革命以降のエネルギー消費量は，バイオマス時代の人類が経験したことのない驚異的な増加率で増えていった．石炭時代におけるエネルギー消費量の増加率も相当なものだったが，石油時代に入るとその増加速度にはいちだんと拍車がかかった．しかし，当然のことながら，採掘が容易で質の高い資源ほど先に採掘される傾向は，石油についても当てはまる．実際，１バレルの石油を産出するために必要なエネルギーは，年々増加傾向を示している．果たして，安価な石油に裏付けられた経済的繁栄は，いつまで安泰なのだろうか．第５章では，石油の将来について論じている．

安価で質の良い石油があとどれだけ地球上に残されているのかという問題を抜きにしても，石油にどっぷりと依存した文明が持続的でないことは，共通認識となっている．地球温暖化問題がいささか強調されすぎている感があるが，人間はこれまで，石油の力を利用して，自然の循環システムを大きく改変し，破壊し，自然の力によって浄化・同化できないさまざまな廃棄物を大量に排出してきた．では，石油に替わる持続的なエネルギー資源はあるのだろうか．多くの人々は，再生可能エネルギーに期待を込めている．もっとも，人類は過去に，再生可能エネルギーに身を委ねた社会を経験している．しかし，化石燃料時代に入ってからの人口規模や１人当たりのエネルギー消費水準は，もはや，古き良きバイオマス時代とは桁違いの水準に達している．現代社会はもう，あの頃とは違うのである．果たして将来，再生可能エネルギーは，人類史上空前の経済的繁栄を支えてきた石油の後継者となり得るのだろうか．第６章では，それについて検討する．

第７章と第８章では，原子力発電について議論する．2011 年に起きた福島第１原子力発電所の事故により，大量の放射性物質が環境中に撒き散らされたことは，記憶に新しい．いわゆる「安全神話」の崩壊とともに，国の原子力政策は厳しい批判に晒され，原子力利用の是非に関する議論を避けて通ることはできなくなった．いま一度，原子力は石油を代替し得るのか，そして，福島原発事故が我々に与えた教訓とは何か，我々は考えなければならない．

さて，第８章まで読み進んだ読者は，石油以外のエネルギー資源について，

私がおおむね悲観的な見解を持っていることを知るだろう．石油ほど優秀なエネルギー資源は他に存在しないのである．石油の消費を減らしつつ，これまでの成長型経済を維持するのであれば，我々に残された道は，技術の進歩によって，わずかな石油から多くの付加価値を生産するより他はない．第 9 章では，その可能性について検討するが，結論として私は，少なくとも現段階では，そのような技術進歩に過大な期待を寄せるのは賢明ではないと考えている．

以上のように，エネルギーと経済に関する本書の議論の末に見えてくる未来は，いまの我々にとって決して明るいものではない．もちろん，読者の危機感をいたずらに煽ることが本書の目的ではない．とはいえ，事実として危機が迫っているのにもかかわらず，それを指摘しないのは何よりも罪深いことであると，私は信じる．安価で質の良いエネルギー資源の稀少化を「技術進歩で解決できる」とタカを括り，さらなる経済成長を追求する姿勢は，狂気に満ちているとしか言いようがない．我々の経済は，たとえるなら，猛スピードで壁に突進している自動車のようなものである．壁が間近に迫っているのにもかかわらず，さらにアクセルを踏み込もうとするのは，正気の沙汰ではない．

本書の最終的な結論は単純である．すなわち，「我々は直ちにブレーキを踏むべきである」と．早目にブレーキを踏めば，社会の壊滅的な損失を避けられる可能性はそれだけ高まる．そのためには，「このままアクセルを踏み続ければ壁に激突する」という健全な危機感が広く社会に共有されなければならない．そして，ブレーキを踏んだ後の社会を，いかにして楽しく心豊かなものに作り変えていくかというところに，人類の叡智を結集させなければならない．

ともかくは，さまざまな立場の人々のあいだで，エネルギー問題に関する活発な議論が繰り広げられることを，心より願っている．本書がその契機となれば幸いである．

なお，本書の出版にあたっては，2016 年度同志社大学研究成果刊行助成の補助を受けた．ここに，感謝を申し上げる。

2016 年 12 月 20 日

石田葉月

エネルギーと経済、そして人間

目　次

はじめに……i

第 1 章　若干の熱力学的基礎…… 1

1.1　エネルギーと熱力学第 1 法則　1

1.2　エントロピーと熱力学第 2 法則　6

1.3　サイクルと定常開放系　9

1.4　熱と仕事　13

1.5　熱力学と熱機関　16

第 2 章　エネルギーの生産…… 25

2.1　エネルギー資源　25

2.2　エネルギーの生産過程　27

2.3　エネルギーとエクセルギー　30

第 3 章　バイオマス時代…… 32

3.1　人類とエネルギー　32

3.2　動物としての人間　34

3.3　マルサス理論　40

3.4　1 人当たりのエネルギー消費　44

3.5　バイオマス社会の限界　56

第 4 章　化石燃料時代 …… 66

4.1　化石燃料とは　66

4.2　人類と化石燃料　70

4.3　化石燃料と道徳・価値観　86

第 5 章　石油文明は安泰か…… 92

5.1　埋蔵量と可採年数　92

5.2　エネルギー収支比　96

5.3 ピークオイル仮説 101
5.4 ピークはいつか 108
5.5 非従来型石油 113

第 6 章 再生可能エネルギー …… 125
6.1 問題の所在 125
6.2 化石燃料によるバックアップ 130
6.3 ストレージ 134
6.4 パワー密度 142
6.5 エネルギー収支比 149

第 7 章 原子力発電 …… 152
7.1 ウラン資源 152
7.2 発電コスト 153
7.3 原子力は石油の代わりにはならない 157
7.4 エネルギー収支比 158

第 8 章 福島原発事故を考える …… 163
8.1 「安全神話」の崩壊 163
8.2 「エネルギー基本計画」 165
8.3 低線量被ばく 168
8.4 「似非」功利主義 173

第 9 章 省エネルギー …… 179
9.1 デカップリング 179
9.2 エネルギー消費と経済成長の因果性 185
9.3 グローバル化と情報技術 187

第 10 章　縮小社会へ向かって …… 190

補論 A　日本経済における石油のエネルギー収支比…… 192

補論 B　EV 社会はどれだけのリチウムを必要とするか …… 196

B.1　はじめに　196

B.2　シナリオ　198

B.3　試算結果　204

参考文献…… 207

事項索引…… 217

人名索引…… 220