

## 地球が直面するトリレンマ

大河内直彦 おおこうち なおひこ  
海洋研究開発機構

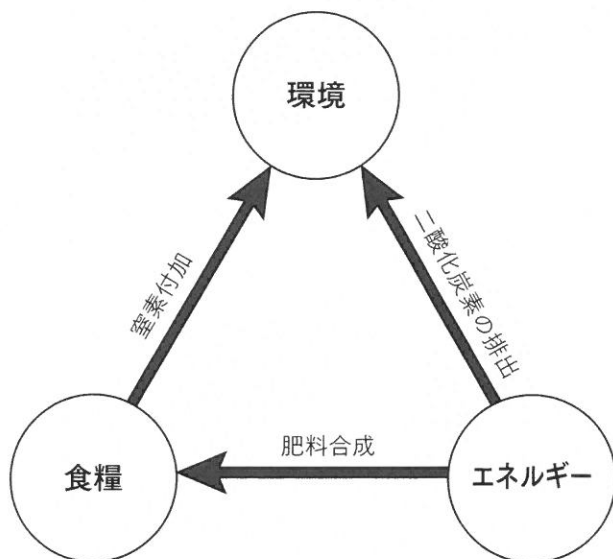
地球上の人口は2012年3月に70億人を突破し、2017年1月現在、74億人近くにまで達している。一時に比べれば少々衰えたとはいえ、それでも毎年8000万人というものすごいスピードで増え続けている。とにかく、今生きている74億人ほどの人々を支えるには、必然的に大量の食糧が必要だ。エネルギーに換算して、1日あたり計 $6.2 \times 10^{12}$  kJが必要となる計算だ<sup>1</sup>。このエネルギーは究極的には、ほぼ全て太陽からもたらされる。

太陽が地表面に届けるエネルギーは、地球全体で1日に $7.4 \times 10^{18}$  kJに及ぶ。この太陽エネルギーのうち、植物によって化学エネルギーとして固定(光合成)されるエネルギーは、その0.1%あまりの $1 \times 10^{16}$  kJほどである<sup>2</sup>。この $1 \times 10^{16}$  kJが、私たち人類を含めて地球上で暮らすあらゆる生き物の根源的エネルギーである。つまり植物を基盤とした生き物の世界では、食物連鎖を通してこのエネルギーが使い回されている。アフリカの草原では、植物からシマウマ、シマウマからライオン、ライオンからハゲタカといった食物連鎖は、とりも直さずエネルギーの連鎖である。生態学の知見に照らせば、栄養段階が1つ上がるごとに利用可能なエネルギー量は1桁下がる<sup>3</sup>。つまり、植物がもつエネルギー量を100とすると、それを食べる草食動物につながるエネルギー量は10、さらにそれを食べる肉食動物につながるエネルギー量は1となる。人間の栄養段階はざっくり言うと3だから<sup>4</sup>、このレベルに属する生物の取り分の総量は $1 \times 10^{14}$  kJである。これは、74億人の人間が健康に暮らすために必要なエネルギーのわずか15倍にすぎない。私たちは、何万種という同じ栄養段階の生物(たとえば、陸上ではキツネや一部の昆虫など、海ではイワシやタイなど多くの魚類)と分かち合うはずのエネルギーを、1種で大量に消費して

いる。今や多くの生き物がレッドリストに載るのも当然である<sup>5</sup>。

私たちの食糧を生み出すための農耕地の面積は、地球全体で見ると過去半世紀にわたって5000万 $\text{km}^2$ でほとんど横ばいだ<sup>6</sup>。人間が使える農耕地は、実質上ほとんど飽和状態にある一方、単位面積あたりの穀物生産量は年々増加の一途をたどり、過去半世紀の間に倍増した。特に、ハーバー・ボッシュ法で生産される窒素肥料など化学肥料が広く行き渡った発展途上国において、農業生産性は著しく改善された。窒素肥料だけ見ても、世界での使用量は半世紀前の4倍に達している<sup>7</sup>。おかげで、この半世紀に世界の人口は34億人から74億人にまで増加した。しかし、農耕地で使われた窒素肥料のすべてが食糧に変わるわけではない。そのおよそ半分は環境中に漏れ出て環境を汚染し、20世紀末の段階ですでに、地球表層を循環している生物利用可能な窒素は、産業革命以前の2倍にまで増加した<sup>8,9</sup>。その結果、多くの湖沼において富栄養化が引き起され、一部では人々の飲料水となる地下水の水質悪化が問題化している。大量の窒素肥料の使用はこういった地域的な問題にとどまらず、一酸化二窒素を通して地球温暖化に寄与し、それがさらに炭素循環を変化させるという全球的な問題にも一役買っている。環境への窒素の過負荷は地球温暖化問題よりも深刻で、もはや回復不能のところまで来ていると見る研究者もいる<sup>10</sup>。

さらに問題は、食糧生産を支える化学肥料の合成に大量の電力エネルギーを必要とすることにもある。増え続ける人々の食欲を満たすために、窒素肥料の合成だけで毎年 $5 \times 10^{15}$  kJを超える大量の電力エネルギーが消費されている。これは世界の一次エネルギーの約1%、電力エネルギーに限るとその1割弱にも達している。現在、世界の一次エネルギーの8割あまりは化石燃料頼みであり<sup>11</sup>、大気中の二酸化炭素濃度は2016年に、ついに400 ppmの大台に乗った。もはや地球温暖化は進行中であるが、よく知られているように、二酸化炭素の排出規制によって地球環境に及ぼす



図一食糧・環境・エネルギーのトリレンマを表す概念図

影響を何とか最小限で食い止めようという努力も一方では続いている。しかしエネルギー需要が減らない以上、化石燃料の使用を減らした分の埋め合わせが必要となる。原子力エネルギーや再生可能エネルギーで賄うことになるが、前者は特に先進国において根強い反対意見に直面するし、後者は徐々に伸びつつあるものの、74億人の欲望を満たすにはほど遠い。

地球という星を総体でみると、食糧・環境・エネルギーという人類にとって3つの必須事案が相互に影響しあう膠着状態、つまりトリレンマに陥っている<sup>12,13</sup>(図)。これを解決するためには、問題解決の基礎となる科学的知見とそれを具現化する技術、そして新しい社会構造などが必要となる。この問題の難しさは、1つを解決しても他の問題が深刻化するようでは意味がなく、3つを同時に解決しなければいけないことにある。これまで多くの人々がさまざまなレベルでこのテーマに取り組んできたものの、経済活動と相性の悪い問題を多く含むトリレンマからの脱却は、現代社会において容易ではない。もちろんこれは今に始まったことではなく、これまでさまざまな形で幾度となく警鐘が鳴らされ<sup>14</sup>、それがこの悩ましき問題の緩和に役立ってきたことは間違いない。しかし、増え続ける人口、大気中の二酸化炭素、エネルギー需要に追いつけられないたちごっこの状況

は今も続いている。

2016年11月4日、二酸化炭素の主要排出国である中国とアメリカを含む200カ国近くが参加するパリ協定が発効された。パリ協定の目標は、「産業革命前からの世界の平均気温上昇が2℃を十分下回る水準に抑制し、できれば1.5℃未満に抑える」というものである。これを達成するために、今世紀後半には温室効果ガスの排出を実質ゼロにするという長期目標も掲げられた。間違いなく、野心的に炭素社会からの脱却を目指すものである。このやり方は、地球温暖化問題の解決のみならず、トリレンマ問題に対してもおそらく正しい入り口だろう。今度こそ、人々の生活スタイルや価値観まで含む社会構造の変革、そしてゆくゆくはトリレンマの解消へと導く布石となることを期待したい。

#### 文献と注

- 1—子供から大人まで1人1日平均2000 kcalと仮定した。もっとも現実には、74億人中8億人について十分に食糧が供給されていない「飢餓状態」にある。
- 2—この推定値は、1 molの二酸化炭素を固定すると、植物バイオマスとしては約480 kJが蓄えられることをもとに計算している。比較的大きな誤差があることに注意。
- 3—たとえば、M. Begon et al.: Ecology: From Individuals to Ecosystems, 4<sup>th</sup> ed., Blackwell(2006)
- 4—窒素、つまりタンパク源でみた数値。大河内直彦・他、未公表データ。
- 5—2016年時点で、レッドリストに記載されている生物の種数は2万種以上に上る。
- 6—FAOSTATのサイト(<http://www.fao.org/statistics/en/>)より。
- 7—International Fertilizer Associationのサイト(<http://www.fertilizer.org/Statistics>)より。
- 8—J. N. Galloway et al.: Global Biogeochem. Cycles, **9**, 235 (1995)
- 9—V. Smil: Cycles of Life, Civilization and the Biosphere. Scientific American Library, New York(1997)
- 10—J. Rockstrom et al.: Nature, **461**, 472(2009)
- 11—国際エネルギー機関の統計サイト(<https://www.iea.org/statistics/>)より。
- 12—D. Tilman et al.: Science, **325**, 270(2009)
- 13—大河内直彦:「地球のからくり」に挑む, 新潮新書(2012)
- 14—ローマクラブによる著名な『成長の限界』はその代表例である。