

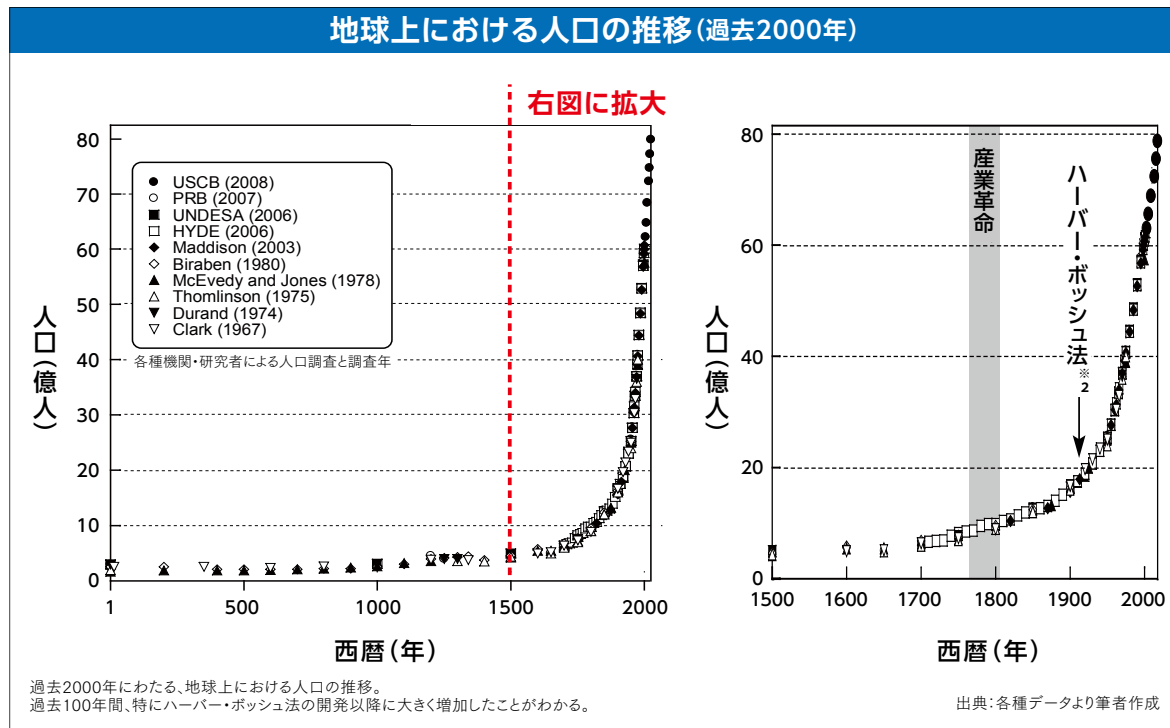


地球の人口は2022年11月に80億人を突破した。古代ローマ帝国が栄えた頃、世界の人口はおよそ1〜2億人と推定されているから、この2000年の間におよそ50倍に膨張したことになる【図1】。特に20世紀半ば以降の伸びは著しく、過去80年ほどの間におよそ3倍あまりになった。地球の人口は、いったいどこまで増え続けるのだろうか？ そもそも地球には定員というものが無いのだろうか？

19世紀初頭のイギリスの経済学者トマス・マルサスは、地球に定員があることを強く意識した。その著書『人口論』の中で、食糧は線形的(直線的)にしか増えないのに対して、人口は指数関数的(ネズミ算式)に増えることを危惧している。後のローマクラブによる『成長の限界』や、バックミンスター・フラーによる『宇宙船地球号』などは、その考えをある意味現代版に焼き直したものとみられることができる。

試みに地球の定員を計算してみよう。太陽が地表面に与えるエネルギーは、日々740京(7.4×10<sup>18</sup>)キロジュール<sup>※1</sup>という膨大な数字だが、このうち植物の光合成によって捉えられ、化学エネルギーとして固定されるものは、そのおよそ0.1パーセントにあたる8000兆キロジュールほどと推定されている。これが地球上のあらゆる生き物の原資である。光合成を通してこのエネルギーを生きたるためのエネルギーに変える植物を除けば、生き物はほかの生き物を食べていくしかないからだ。地球上の

【図1】



## 地球が直面するトリレンマ

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 海洋機能利用部門 部門長 おおこうち なおひこ 大河内 直彦氏

本誌においてこれまでも数多く取りあげてきた、環境問題、エネルギー問題、食糧問題。これら地球の課題は、今ますます深刻な様相を強めています。そしてこれらは20世紀半ば以降、爆発的な膨張を続ける地球人口問題と密接に関わっています。

今回の特集の筆者・大河内直彦氏は、地球生命科学の観点から「そもそも地球には定員というものが無いのか」と疑問を投げかけ、それぞれの問題の本質と相互の関係性を解き明かしていきます。

あらゆる生き物は、太陽エネルギーを使い回して生きていくともいえる。生き物の世界では、植物が扶養者で、あらゆる動物は被扶養者なのである<sup>※3</sup>。

※1 1ジュールは1ニュートンの力で物体を1メートル動かすときの仕事。1キロジュールはおよそ4200カロリーにあたる。

※2 20世紀初頭、ドイツで生まれた「空中窒素の活用技術」。大学の化学者フリッツ・ハーバーと化学会社の研究員カール・ボッシュが、従来工業化不可能とされていた気体の窒素と水素からのアンモニア合成に成功した。これにより、アンモニアを原料とする窒素化合物を使った化学肥料によって作物の大量生産が可能となり、世界人口の急増を支えた。

※3 大河内直彦（2012）『地球のからくり』に拠る。新潮新書。

## 食物連鎖からみた地球の定員

生き物の世界をさらに詳しく覗いてみよう。生き物同士の「食う―食われる」の関係は食物連鎖と呼ばれ、その食物連鎖を通してほかの生き物へとエネルギーが受け渡されていく。アフリカの草原では、草原に生えた植物はシマウマに食べられ、そのシマウマはライオンに襲われ、ライオンが死ぬとハゲタカが集まってくる。こういった食物連鎖の世界は、光合成をする植物を1とすると、それを食べる草食動物（シマウマ）が2、それを食べる動物（ライオン）が3、さらにそれを食べる動物（ハゲタカ）が4…というふうに「栄養段階」として数値化される。

食物連鎖は、とりも直さずエネルギーの連鎖を表している。生態学の知見に照らせば、栄養段階が一つ上がるごとに利用可能なエネルギー量はおよそ10パーセントになる<sup>※4</sup>。

エネルギーを独占してしまうと、理論上、同じ栄養段階のほかの生き物は絶滅してしまう。栄養段階が3の生き物に割りあてられた80兆キロジュールのうち、どの程度の割合を人間が使ってもよいか？ という問いに答えるのは難しいが、仮に1パーセントとすると、地球上における人間の定員はわずか8000万人ということになる。古代ローマ時代の頃の人類は、比較的自然の理にかなった生き方をしていたのかもしれない。ところが、現在の人口はそれを桁違いに上回る80億人あまり。今や絶滅危惧種（レッドリスト）に4万種以上登録され、そのリストが年々長くなっているのは当然の成り行きである。

※4 M. Begon et al. (2006) Ecology: From Individuals to Ecosystems, 4th ed. Blackwell

※5 一人一日平均約2265キロカロリーと仮定した「農林水産省推定値」。もっとも現実には、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。

## 生態系の条件から抜け駆けした人類

いずれにしても、ほかの種のことを考えれば、すでに定員を大幅に突破していることは間違いない。ではなぜ80億人という未曾有の数字を達成できたのか？ その答えは「農耕」である。今を遡ることおよそ1万年、私たち人類は、農耕というすばらしい抜け道を発明した。農耕とは、田畑に作物を植えて人類が自らの食糧をつくり出す行為のことだが、見方を変えれば、人類だけのために特

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。捕食者は被食者すべての個体を食べ尽くすわけではない（少なくとも次世代を残さねばならない）、生態系が持続的なものになるためには、これくらいのエネルギー・バランスがちょうどよい。

一方、人間の栄養段階はざっくりいうと3だから、このレベルに属する生物の取り分の総量は、8000兆キロジュールの約100分の1、80兆キロジュールほどである。人間は野菜（栄養段階1）も食べるが、魚など高い栄養段階（3〜5）のものも食べるため、平均するとそういう数字になるのである。それに対して、人々が健康的に生きるのに必要とする基礎代謝エネルギーは、一人あたり一日に10000キロジュール程度である<sup>※5</sup>。だから単純に割り算すると、地球の定員はおよそ80億人ということになる。私たちは、すでに定員に達しているということだろうか？

そう単純な話ではない。まず、この計算には地球上に暮らす、数千万種ともいわれるほかの生き物が考慮されていないことだ。栄養段階が3の生き物はほかにもたくさんいる。草食動物を襲って食べるライオンだけでなく多くの昆虫もこの栄養段階に属する。海では人間のタンパク源となってきたイワシやタイなど多くの魚類がそうだ。だから人類が栄養段階3のところに流れてくるすべての

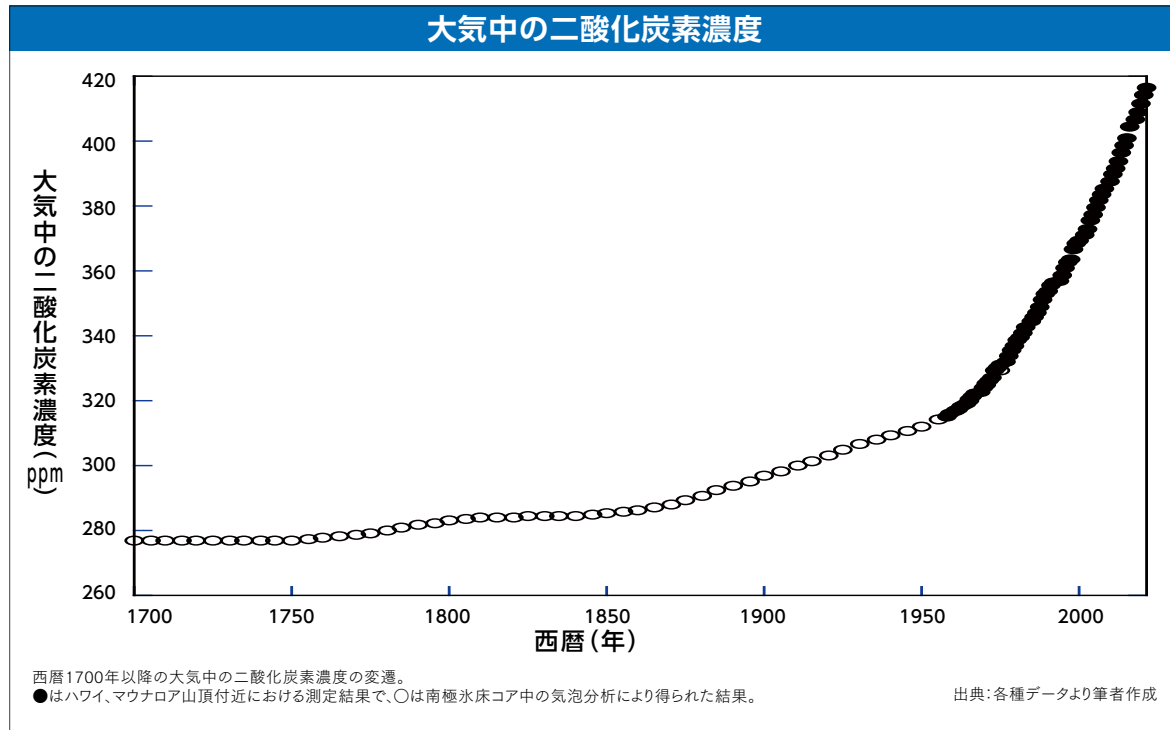
定の土地に降り注ぐ太陽エネルギーを独占するシステムのことである。つまり、地表面を人類が独占して自分たちだけの食物をつくるメカニズムなのである。これによって、私たち人類は上述のような「生態系の束縛条件」から抜け駆けすることができたのである。

自然の道から逸れた道を歩み始めた人類は、さらなる豊かさを求めて、食糧以外のエネルギーを探し、利用し始める。水や風の流れを利用した水車や風車のようなからくりが考案されたのは、紀元前のことである。その後、人類は化石エネルギーに目をつける。石炭は化石燃料の中でも最も古くから用いられている。ただし石炭は、燃やすとスガ出たり悪臭を放ったりするから、昔から問題の多いエネルギー源だった。その利用が人類史にとって重要な意味をもつようになるのは、産業革命が起きた18世紀以降のことである。

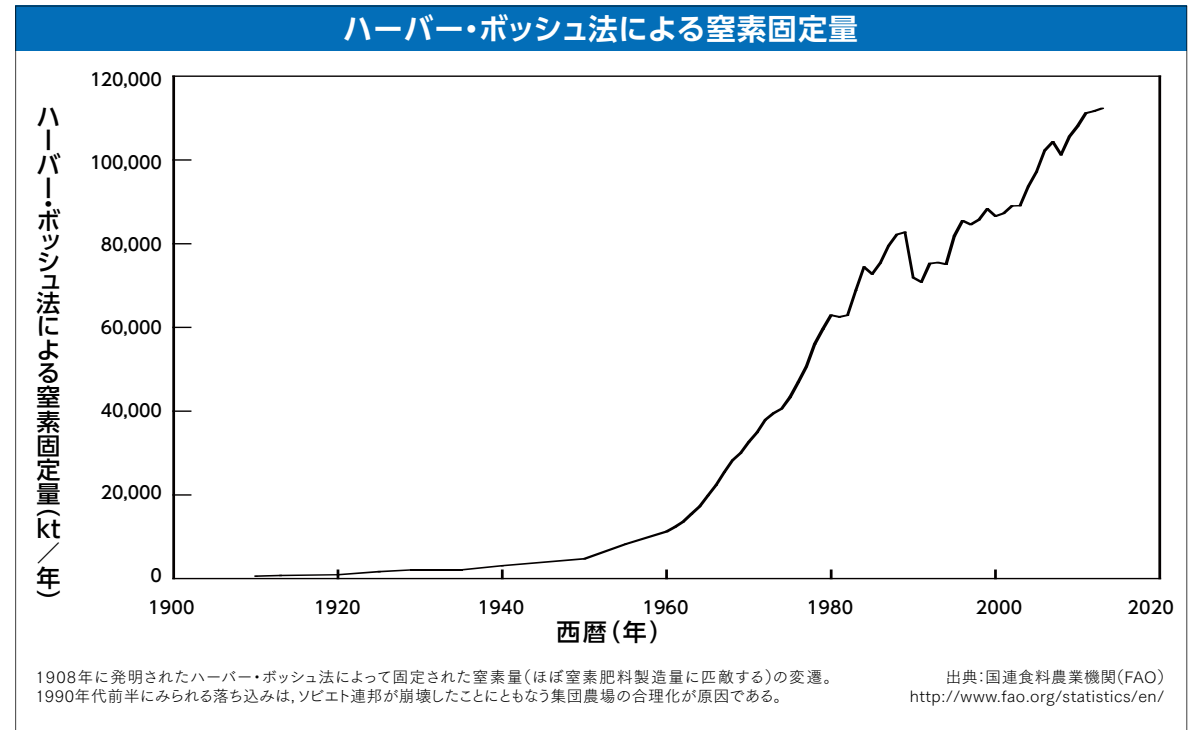
石油は、19世紀中頃にアメリカや東欧で利用され始める。液体なので石炭より採掘しやすく（自噴する）、蒸留によってその質も改善できるから、その利用は瞬く間に世界中に広がった。20世紀後半には、石油とともに産出することの多い天然ガスが、電力に特化したエネルギー源として利用されるようになった。こういった化石燃料がもつエネルギーは、いずれも究極的には過去の太陽エネルギーが起源である。

太古の植物が光合成によって得た太陽エネルギーの一部が、地中に保存されているわけだ。それが化石エネルギー

【図3】



【図2】



引き起こしていることは周知のとおりである。大気中の二酸化炭素濃度は、2021年現在で平均420ppm近くに達しており、これは産業革命以前の自然な状態(280ppm)から5割増である【図3】。世界の平均気温はこの半世紀に1℃近く上昇し、海面は今や年に約4mm上昇している。最近、わが国では毎年のように豪雨被害が相次いでいるが、気象庁の統計によると、過去半世紀近くわが国における大雨や猛暑日の年間発生回数は着実に増えている<sup>※7</sup>。地球温暖化との関連性を厳密に証明することは難しいとはいえ、両者の関係は詳細な研究によって長らく指摘されてきたことである<sup>※8</sup>。

地球温暖化は進行中であるが、二酸化炭素の排出規制によって地球環境に及ぼす影響をなんとか最小限で食い止めようという努力も一方で続いている。しかし人口が増え続ける以上、エネルギー利用の効率化が人口増加(年に約1%)を上回らないかぎりエネルギー需要は減らないし、化石燃料の使用を減らすなら、その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、人々の欲望を満たすにはほど遠い。いずれにせよ、問題の本質が、定員を大幅に超えた私たち人類の活動にあることは明白な事実である。

私たちの食糧を生み出す農耕地の面積は、地球全体でみると過去半世紀にわたって5000万平方キロメートル

である。それぞれレシピは多少違うが、元はといえば光合成によって生み出された有機物である。そんな化石エネルギーを、人類は自動車や飛行機などの燃料に用い、また石油を原料として数多くのモノを生み出してきた。それだけではない。現代は驚くべきことに、食糧生産でさえエネルギー頼みだ。農業では、効率よく植物を育て収穫するために、化石燃料を使ってトラクターやコンバインといった大型の農業機械が利用される。

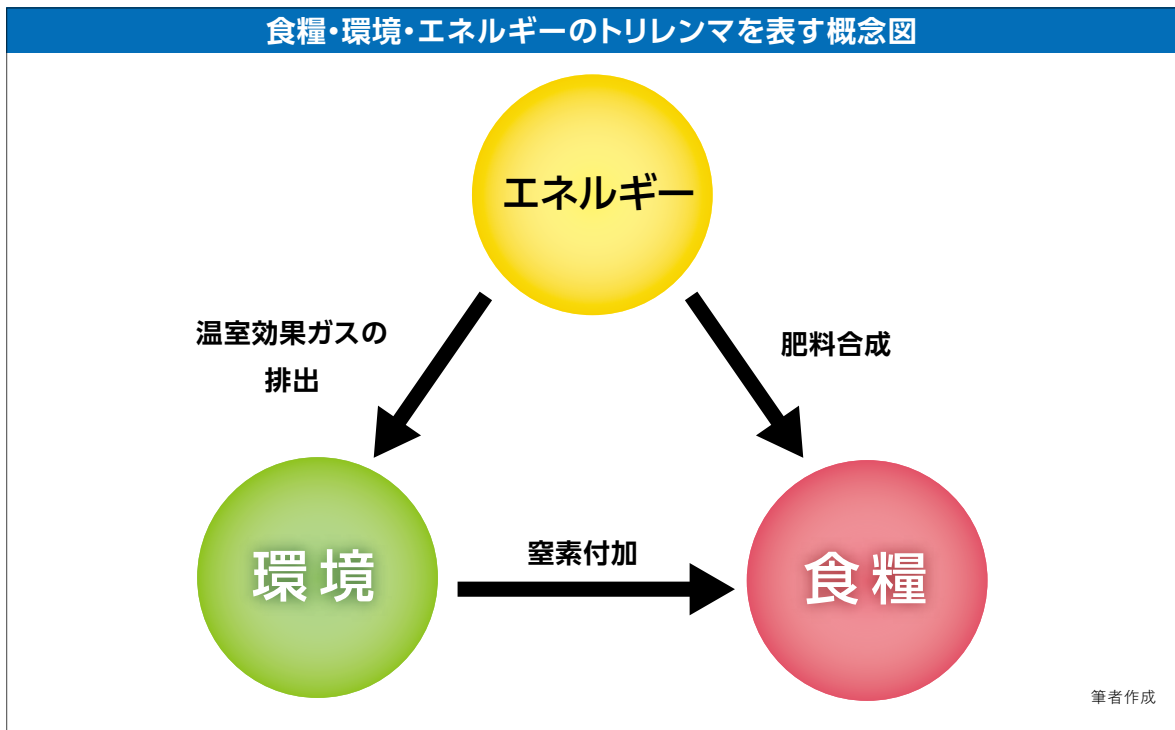
しかし最大の問題は、化学肥料(特に窒素肥料)の合成に大量の電力エネルギーを必要とすることだ。増え続ける人々の食欲を満たすために、人類は大量の窒素肥料を合成せねばならず【図2】、そのために現在5000兆(5×10<sup>15</sup>)キロジュールを超える大量の電力エネルギーが毎年消費されている。これは世界の一次エネルギーの約1%、電力エネルギーに限るとその1割にも達している。現在、世界の一次エネルギーの8割あまりは化石燃料頼みである<sup>※9</sup>。つまり増え続ける人口を支えるにもエネルギーが必要で、そのために大量の化石燃料を燃やし続けねばならないわけだ。

※9 国際エネルギー機関の統計サイト(<https://www.iea.org/statistics/>)より。

人口増と農耕地と窒素肥料の関係

化石エネルギーを利用することが、地球温暖化問題を

【図4】



ルでほぼ横ばい状態にある。地球上の全陸地面積はおよそ1億5000万平方キロメートルなので、そのおよそ三分の一が農耕地として利用されていることになる。残りの三分の二は、寒すぎたり、暑すぎたり、乾燥しすぎだったり、都市や住宅地だったり、農耕に適さない場所である。人間が使える農耕地は、地球という星の上では、実質上ほぼ飽和している。

その一方で、農産物の単位面積あたりの生産量は年々増加の一途をたどり、過去半世紀に倍増した。特に、ハーバー・ボッシュ法で合成される窒素肥料のおかげで、発展途上国における農業生産性は著しく改善され、このトレンドは現在進行形でもある。窒素肥料だけみても、世界での使用量は半世紀前の4倍に達している【図2】。おかげで、この半世紀に世界の人口は39億人から80億人あまりにまでほぼ倍増した。

しかし、農耕地に撒かれた窒素肥料のすべてが食糧に変わったわけではないことは、先の数字からもうすうす想像がつく。肥料は4倍になれども人口は2倍。ということとは、荒っぽくいえば、撒いた肥料のおよそ半分は食糧になつたが、残り半分はどこか別のところへ行つてしまったことになる。いったいどこへ行つたのだろうか？ 早い話が、農地からあふれ、環境中に漏れ出たのである。環境中に漏れ出した窒素肥料は、いろいろな悪さをする。

一部は、湖沼や沿岸海域において富栄養化<sup>※9</sup>を引き起こす。赤潮を引き起こし、生態系を壊し、漁業に悪影響

を与える。一部の地域では飲料水の汚染や悪臭問題を引き起こし、暮らして密接したさまざまな問題も引き起こす。さらに、ローカルな影響にとどまらず、グローバルな問題にもつながっている。一分子あたり二酸化炭素の300倍の温室効果をもつ一酸化二窒素を生むのである。実際、大気中の一酸化二窒素の濃度は過去半世紀に1割以上増加し、地球温暖化問題にも影響を与えている。このように人工的に合成される窒素が引き起こす環境問題は多様である。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きているという見方もある<sup>※10</sup>。

※7 気象庁／大雨や猛暑日など極端現象のこれまでの変化  
[https://www.data.jma.go.jp/cpd/info/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpd/info/extreme/extreme_p.html)

※8 異常気象と地球温暖化の関係についての詳しい解説は以下のサイトを参照。  
<https://www.ogeries.go.jp/ja/news/2013/130911.html>

※9 沿岸海洋や湖沼などにおいて、硝酸やリン酸など栄養塩の濃度が上昇し、大量の植物プランクトンが増殖するような環境になること<sup>1)</sup>

※10 J. Rockstrom et al. (2009) Nature, 461, 472-475.

## 食糧・環境・エネルギーの三棘み

地球全体で考えると、食糧・環境(地球温暖化を含む)・エネルギーという人類にとって三つの必須事案が三棘みの状態、つまり「トリレンマ」に陥っている【図4】<sup>※11</sup>。地球温暖化問題を解決しようとするエネルギー問題に直面するし、そしてエネルギー問題は食糧問題の隠れた原因

になる。一つの問題を解決しようすると、別の問題が顔を出すというモグラ叩きの構図である。このトリレンマを解決するには、問題解決の基礎となる科学的知見、それを具現化する技術、そしてそれを受け入れる社会構造が必要である。しかし最も難しいことは、食糧・環境・エネルギーの三つを同時にバランスよく解決しなければいけないことだろう。一つを解決してもほかの問題が深刻化するようでは不十分である。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、スケールの違いこそあれ20世紀以降継続して起きてきたことであつた。冒頭に挙げた『成長の限界』や『宇宙船地球号』などを通して、これまでさまざまな形で幾度となく警鐘が鳴らされ、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。幸いにして、地球環境にはバッファ(緩衝)能力があり、急激な変化を緩やかに受け入れる懐があらかじめ備わっている。しかし、増え続ける人口、大気中の温室効果ガス、エネルギー需要に追いかけられ、人類社会のモグラ叩きといったごっこは年々スケールアップし、地球環境が元来備えていたバッファ能力ではもはや対応しきれなくなりつつある。

※11 大河内龍彦(2017)科学、87,9-10.

## ほんとうに怖いのは人々の行動

地球温暖化問題、食糧問題、エネルギー問題の真の怖さは、その字面の外にあることもきちんと理解しておくべきだろう。たとえば地球温暖化問題では、地球の気温が上昇することのほかに、世界各地の氷が解けて海面が上昇すること、極端な気象現象が増大することなどがハイライトされがちだ。もちろんそれも問題だが、ほんとうに怖いのは、それに誘発される人々の行動かもしれない。

その点、私たち日本人にはよい教訓がある。2011年の東日本大震災である。その時、何が起きただろう？

私の生活圏は、震源域から数百キロメートルも離れている。ふだん車通りの激しい国道では、地震直後の停電で信号機が消えていたが、交通事故など目につく大きなトラブルは特に見かけなかった。震源から離れた街でほんとうに困ったことは、地震の揺れでもなく、津波でもなかった。それは、地震直後から多くの人々が買い占めに走り、あらゆるスーパーマーケットの棚からパンや米などの食料品が消えてしまったことであり、日々何かと使うインターネットの回線が混雑してつながらなかったことであり、ガソリンスタンドに多数の車が殺到してガソリンが底をついてしまったことだった。人々の行動原理はきわめて刹那的で、予測することが難しい。大震災が残した教訓は、現在私たちが直面しているトリレンマにも通じるだろう。



国立研究開発法人 海洋研究開発機構  
海洋機能利用部門 部門長

大河内 直彦

1966年、京都市生まれ。

1995年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。

京都大学特別研究員、北海道大学助手、米ウツズホール海洋研究所博士研究員などを経て、2019年から現職。

2022年日本学士院エンジンバラ公賞を受賞。

著書に『チェンジング・ブルー―気候変動の謎に迫る―』（岩波現代文庫、講談社科学出版賞受賞）、『地球のからくり』に挑む（新潮新書）『地球の履歴書』（新潮選書）など。

たとえば、干ばつによる食糧不足が引き起こす人間の心理の変化、飢えた大衆の行動は、きわめて危険な状況を引き起こさないだろうか。難民を生み、ちょっとしたきっかけで暴動や略奪などの反社会的行為が局地的に起きるかもしれない。その影響が雪だるま式に膨れ上がる、特定の地域だけでは収まらない深刻な安全保障上の問題に発展する可能性もある。大震災直後の日本国民がとった行動は、上記のような問題があったとはいえ、比較的冷静かつ秩序だっており海外から高い称賛を得たが、それはわが国固有の問題だったからかもしれない。世界的な災害は、過度なナショナリズムの高揚を引き起こし、それが安全保障の問題にまで発展しないなんて、いったい誰が断言できるだろう？

2023年11月30日から、中東のドバイでCOP28（国連気候変動枠組条約第28回締約国会議）が始まる。人口が世界一になったインド、二酸化炭素の主要排出国である中国を含む多くの国々が参加予定である。トリレンマ問題を一気に解決する処方箋はない。小さな一歩を一つずつ重ねていくことが、唯一無二の解法である。人々が、地球の将来と私たちの子孫の将来を考える契機になることを願っている。