

人類紀を生きる:窒素編

大河内直彦 おおこうち なおひこ
海洋研究開発機構

「人類紀」, 英語では Anthropocene。オゾン・ホール¹の理論的研究でノーベル化学賞を受賞した Paul Crutzen によって 2002 年に書かれた論文¹によって世に広められた用語である。最近, この「人類紀」をさまざまな場で見聞きするようになっている²。そこで, その理由について考えてみたい。

地球の歴史 46 億年を通して地球環境の変化を引き起こしてきたのは, 日射の総量と分布の変化であり, 隕石の衝突であり, 巨大火山の噴火であった。しかし産業革命以降, 特にこの 100 年あまりに起きた地球環境の変化は, 少なくとも 1000 万種はいると言われる生物のうちわずか 1 種が知恵を絞って, 地面に穴を開けて化石燃料を掘り出して燃やしたり, 大気中の窒素を生物に利用可能な化学形に変えたり, 大地の一部が区切られてその種だけの食糧が生産されたことなどに起因している。見方によっては, これらも所詮「自然の」プロセスなのかもしれない。しかし, それらが過去 46 億年間に一度も登場しなかったこと, 従来の地球環境を大きく変えるまで大規模化していること, 生物種の絶滅を数多く引き起こしていることなどを勘案すれば, 地球は新しい時代, つまり人類紀に突入したと考えることは理に適っている。ただしこういった考えは新しいものではなく, 同様の概念は以前からあった。その源流を遡っていけば, 20 世紀前半に「生物地球化学」を提唱したロシアの Vladimir Vernadsky にまでたど

り着く³。

一般には, 化石燃料の燃焼によって大気中に放出される二酸化炭素とそれともなう地球温暖化問題は, 人為的に引き起こされた地球環境問題の筆頭とみなされがちだ。しかし専門家の間では, 人類による地球の窒素循環の擾乱もそれに劣らず重大であると見られている。本稿ではこの窒素問題に焦点を当てることにしよう。

耕地において最も重要な養分となる元素は, よく知られているように窒素・リン・カリウムである。そのうち窒素のみが, 揮発して大気中に逃げていくことから, 19 世紀から窒素肥料は特に重視されてきた。増え続ける人類に安定して食糧を供給するために必須の窒素肥料は, 20 世紀初頭に発明され実用化されたハーバー・ボッシュ法に今も大きく依存している。これは, 大気中に多量に存在する不活性な窒素ガス(N_2)を水素で還元して工業的にアンモニアを合成するものである。合成されたアンモニアは, 尿素などとして耕地に施される。歴史的にみると, ハーバー・ボッシュ法を用いた窒素肥料生産が急増するのは, 発明から半世紀後の 1960 年以降のことである(図)。また現在世界で最も人口の多い中国では, 1972 年にニクソン大統領が訪中し国交を樹立した際にハーバー・ボッシュ法の工場建設を約束し, それ以降中国の農業生産は急速な発展を遂げた。こうした人工的に固定される窒素は, 今年年間 1 億 t を超えるまでになっている(図)。もしこの窒素肥料が世界の総耕地面積 1500 万 km^2 に平均的に撒かれたとすると(もちろんそんなことはないのだが), その窒素量は 1 km^2 あたり年間 8 t (1 ha あたり 80 kg) にもなる。こういった施肥の効果などにより, 地球全体で見ると単位面積あたりで生産される食糧, つまり作物の収穫量は 20 世紀を通して 6 倍になり,

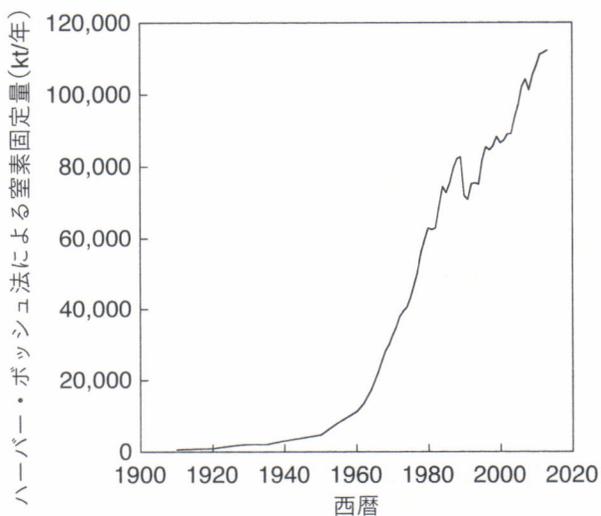


図1—1908年に発明されたハーバー・ボッシュ法によって固定された窒素量の変遷

1990年代前半にみられる肥料生産量の落ち込みは、ソビエト連邦が崩壊したことともなう集団農場の合理化が原因である。出典は文献4と8。

今なお増加中である。この人工窒素肥料がなければ、地球の人口は30億人ほど少なかっただろうと推定されている⁴。こういった数字からも、窒素循環に関わる人類活動がいかに地球環境を変えてきたのかがわかる。同じアンモニア合成(窒素固定)は、一部のバクテリアなどによって生物学的にも行われている。人為的な窒素固定のスピードは天然における窒素固定のそれをすでに凌駕しており、人類は20世紀初頭以降このプロセスの「パイプ」を有意に太くしてきたことになる。

地球の営みに人為的なプロセスを付け加えたことは、人類の繁栄に重要な役割を果たしてきたわけだが、地球環境にとっては同時に多くの副作用を生み出してもきた。実際の耕地における観察結果によると、施肥された窒素のうちせいぜい8割、多くの場合は半分程度しか植物に吸収されていない⁵。つまり、撒いた肥料のそれなりの割合が、環境中に残される計算だ。そしてその余剰分は環境中に広がり、さまざまな局面で悪役として振る舞うことになる。長期的にみれば、そのほとんどは脱窒によって再び窒素ガスに戻るのだが、そうなる以前に、環境中を巡り悪さをして回る。たとえば肥料の一部は、地下水や河川を経由して湖沼や海洋に流れ込む。湖沼や海洋の沿岸部の生物生産を刺激し、富栄養化を引き起こしてきたことは

周知のとおりである。簡単な試算によると、現在のこの状況は、白亜紀にかつて海洋が広範囲に無酸素環境になった時代に匹敵するものだという⁶。地球がもつ受容力をすでに大きく超えてしまっているという見方もあり⁶、それがもし本当なら、ハーバー・ボッシュ法の影響は地球史に長らく記録される地質イベントになるだろう。

また人工的な窒素固定は、大気環境の変化にも深く関わっている。耕地に施された窒素肥料からは、硝化・脱窒によって強力な地球温暖化ガスである亜酸化窒素(N_2O)が生まれている。現在、大気中にわずか330 ppb程度しか含まれていないものの(ハーバー・ボッシュ法が出現する以前、その大気中の濃度は275 ppbほどだった)、大気中の亜酸化窒素は二酸化炭素に比べ100倍長い寿命をもつことから、その影響は決して無視できない。また土壌中の窒素化合物の一部は、酸素と反応して窒素酸化物(NO_x)になって揮発し、成層圏において紫外線を防ぐオゾン層が破壊される一因となっている⁷。

地球環境の変遷を詳らかにし、変化の原因やメカニズムについて深く考察してきた地球科学だからこそ、現在直面する多様な問題解決にも資するはずである。地球科学とは、太古の昔を扱う歴史科学であると同時に、現在の地球の営みを理解する応用科学でもある。地球科学の教育の現場において、現代社会が直面する上述のような問題をきちんと啓蒙することは今後ますます重要になってくるはずだ。「人類紀」という言葉は、そのような場において背景を理解させたり、正確な視点をもたせたりすることに一定の役割を果たしていくだろう。

文献

- 1—P. J. Crutzen: *Nature*, **415**, 23(2002)
- 2—たとえば、*The Economist* 誌の以下の記事。http://www.economist.com/node/18741749
- 3—V. I. Vernadsky: *The Biosphere*(English translation), Springer (1997)
- 4—V. Smil: *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, MIT Press(2001)
- 5—V. Smil: *Feeding the World: A Challenge for the Twenty-First Century*, MIT Press(2000)
- 6—J. Rockström et al.: *Nature*, **461**, 472(2009)

氷河融解時代の氷河関連研究

渡辺 惇二 わたなべ ていじ

北海道大学大学院地球環境科学研究院教授

山好きの研究者にとっては、氷河に覆われた高山での調査は憧れです。私自身も生まれて初めて本物の氷河を南米アンデス山脈で見た時には感動したものでした。それは、人間のスケールをはるかに超えた世界を感じるからかもしれません。

氷河は古くから様々な分野で研究の対象となってきました。自然地理学においても、氷河が過去にどのくらい拡大していたのかを復元する研究が行われてきました。フィールドを丹念に歩き回り、航空写真や衛星画像を解析することで、異なる時代の氷河地形を探し出して、それを鍵に過去の氷河分布の変遷を復元してきたわけです。

最近、氷河は地球温暖化との関係から盛んに議論されるようになってきました。それは、氷河が水資源や観光資源として、あるいは災害発生源として、私たちの生活と大きく関わっているためです。

ここでは、氷河関連研究のうち、温暖化と結びつけた、氷河湖決壊洪水を例に最近の研究について述べてみましょう。

氷河湖決壊洪水とその研究

氷河が融解すると融けた水が氷河の表面・内部・底部を伝って下流へと流れ出します。その水が凹みに溜まって湖を作ります。これを氷河湖と呼びます。氷河湖は氷河の表面にできるだけではなく、底部や側部などにもできます。氷河湖が氷河の表面にできる場合は、湖水が氷河そのものと接していることから、ひじょうに大きな速度で湖水域が拡大していきます。氷河湖が大きくなると、やがて湖水を支えていた周辺の地形、たとえばモレーン(氷河が前進した際に堆積した土砂でできた土手状の地

形)が壊れて、氷河湖から水が一気に下流に流れ出します。この洪水を氷河湖決壊洪水(glacial lake outburst flood; GLOF)と呼びます。

GLOFの研究はアイスランドや、極北カナダ、アンデス山脈などでは比較的古くから行われてきました。ところがヒマラヤでは、GLOFの発生については最近まで研究がありませんでした。ヒマラヤでは氷河湖の形成が1950年代に入ってから始まったことがその理由の一つであったと考えられます。

ヒマラヤでGLOF研究が盛んになったのは、1980年代に入ってからのことです。ヒマラヤの中でも、最も多くの研究が行われている氷河湖は、ネパール、サガルマータ(エベレスト山)国立公園にあるイムジャ氷河湖です(図1)。そこでは、国際誌に公表されただけでも30編近い論文があり、湖の発達過程についての知見が蓄積しています。また、最近では地中レーダー探査や電気探査などの手法を導入して氷河の厚さやデブリに覆われた地中に氷河が残っているのかどうかを探る調査が行われつつありますし、湖底地形と水深の調査も進んでいます。

一方、活発な議論の対象となっている例としては、湖の面積拡大があります。少なくとも12の論文が議論をしており、これらのデータをまとめると(図2)、傾向としては一定速度で面積が拡大してきていることがわかります。しかし、個々の研究では、拡大速度に変化が生じていたり、2000年代中頃から拡大速度が大きく落ち込んだり、あるいは逆に加速したりと、結論はさまざまです。

これらの異なる見解は、将来のGLOF発生の大小の予測に直接的に影響を与えてしまうため、大きな問題になっています。研究者によって異なる見解が出ることは科学の進展の中では当然生じることですが、地元住民や自治体・政府職員、政策決定者らステークホルダーにとっては理解に苦しむことでしかありません。そのため、ステークホルダーが科学を信用しなくなる危険があります。特に災害にかかわる研究では、GLOFにかかわらずきわめて大きな問題だと言えます。