

— 随想 —

二酸化炭素

蓬萊秀人

二酸化炭素は、私たち人類を始めとする地球上のあらゆる生物と密接な関わりを持っている。酸素呼吸を行う生命体の多くは、外部より酸素を体内に取り込み、細胞内のミトコンドリアでブドウ糖を二酸化炭素と水とに酸化分解している。このときの酸化反応で生成するエネルギーをATP：Adenosine Triphosphate（アデノシン三リン酸）を介して取り出し、生命活動を維持している。そして、副産物として生成する二酸化炭素を呼吸により体外に排出している。逆に、細胞内に葉緑素を備える植物は、二酸化炭素と水とを体内に取り込み、太陽光をエネルギー源とする光合成を行って糖質やデンプンを合成している。そして、その光合成の副産物として生成する酸素を体外に排出している。夜間など太陽光を吸収できない環境では、光合成により蓄えた糖質やデンプンを体外から取り込んだ酸素により酸化分解し、生命維持に必要なエネルギーを取り出している。このとき、酸素呼吸を行う生物と同様、副産物として二酸化炭素を体外へ排出している。このような観点から、酸素呼吸や光合成を行う生物が生命活動を維持する上で、二酸化炭素は切っても切れない深い関係にあると言える。

また、二酸化炭素は無色透明、無味無臭、人畜無害であることから、私たちの食生活にも密接な関わりを持っている。炭酸水に象徴される炭酸飲料、ビールやスパークリングワインなどの発泡酒、パンなどの発酵食品がその代表例である。炭酸飲料や発泡酒から得られる喉への爽快な刺激は、二酸化炭素（CO₂）の水への溶解度が大気中の酸素（O₂）や窒素（N₂）などに比べて極めて高く、水（H₂O）に溶けて炭酸（H₂CO₃）を生成し、これが弱酸性を呈することに起因している。パンの柔軟な食感と豊かな風味は、酵母（イースト菌）がパン生地を糖質を発酵により、二酸化炭素とアルコールとに分解し、これがグルテン組織に入り込みパン生地を膨張させることに由来している。これらの飲料や食品は、麹菌や酵母など微生物の営みを人類が上手く食文化に

取り入れたものであり、二酸化炭素が人類にもたらした恩恵でもある。

一方、私たちの経済活動に目を転じれば、産業ならびに医療用として利用が拡大している炭酸ガスレーザ、金属同士をつなぎ合わせるアーク溶接のシールガス、低温側から高温側へ熱を移動させるヒートポンプの冷媒、食品の保冷剤等々、産業や民生向けとして多くの二酸化炭素が利用されている。なかでも、商標名「エコキュート」で知られる温水器は、二酸化炭素を冷媒として用いたヒートポンプで、2001年から市販が開始され一般家庭に広く普及している。これは、外気から熱を集めて80℃以上のお湯を沸かす仕組みであるため、消費電力が従来の電気式（ジュール熱）温水器の1/3～1/4で賄えることから、極めて効率的な省エネルギー機器である。これらの工業製品は、人類の英知を結集して二酸化炭素の特性を上手く利用した賜物でもある。なお、このような産業用二酸化炭素は、石油化学コンビナートなどで副産物として生成するものを分離回収して製造されており、その年間生産量は100万トンを超えている。

以上のように、二酸化炭素が人類にもたらした恩恵とは逆に、二酸化炭素が温室効果ガスの悪玉の代表格としてマスコミなどから槍玉に挙げられ始めたのは1988年にIPCC：Intergovernmental Panel on Climate Changeが発足してからである。IPCCは、国連気候変動に関する政府間パネルで人為起源の地球温暖化による気候変化、影響、適応、緩和方策等に関し、科学的、技術的、社会経済学的な観点から包括的な評価を行うことを目的に、国連環境計画（UNEP：United Nations Environment Program）と世界気象機関（WMO：World Meteorological Organization）により設立された国際機関である。このIPCCが2013年に公表した第5次評価報告書によれば、人類が二酸化炭素の排出量削減に関して何の手

段をも講じることなく産業活動を続けて行くと、今世紀末には地球の平均気温が0.3～4.8℃、海面水位が0.26～0.82mに上昇し、気象や生態系に悪影響を及ぼすと警鐘を鳴らしている。現に、ここ近年の頻発するゲリラ豪雨、台風の大規模化、竜巻の多発化、太平洋側での記録的積雪等々、日本のみならず世界各地で同様の異常気象が観測されている。昨年（2019年）9月と10月に襲来した台風15号および19号は、関東や東北に甚大なる被害の爪痕を深く残し、一昨年（2018年）7月の関西豪雨による災害や、9月の台風21号上陸による関西空港の浸水および連絡橋へのタンカー衝突事故などはまだ記憶に新しい。これらの異常気象に関しても温室効果ガスである二酸化炭素の大気中濃度の上昇による影響であるとIPCCは結論づけている。大気中の二酸化炭素濃度は、1750年ごろから始まった産業革命前は280ppmでバランスしていたが、経済成長に伴う化石燃料の大量消費により、その均衡が急激に崩れて増大し415ppmを超えたことを米国海洋大気庁が2019年5月に報じている。

地球温暖化の緩和策として、温室効果ガスである二酸化炭素の排出量を削減して今世紀末までに地球平均気温の上昇を産業革命前の2℃未満、さらには、1.5℃未満を努力目標とすることが2015年12月にパリで開催されたCOP21（第21回気候変動枠組条約締約国会議）いわゆるパリ協定で決議された。本パリ協定において我が国は、2013年を基準として2030年までにCO₂の排出量を26%削減することを、2050年までには80%削減することを目標として掲げている。加えて、2019年12月3日から15日に渡りスペインの首都マドリッドで開催されたCOP25（第25回気候変動枠組条約締約国会議）では、パリ協定を順守し運用して行くための具体的なルール作りとそのスケジュールの確認が行われたが、合意には至らず2020年11月に開催予定のCOP26に持ち越された。

EDMC：The Energy Data and Modelling Centerのエネルギー・経済統計要覧2019年版によると、世界における二酸化炭素排出量は325億トンで、排出量が多い順番に中国28%、アメリカ15%、インド6.4%、ロシア4.5%、日本は3.5%の5位で、上位3カ国で全体の半分以上を占めている。排出量1位の中国は、主要先進国の仲間入りを果たしていないとの認識か

ら、経済成長が最優先の政策が執られPM2.5や光化学スモッグなどの公害対策を始めとする環境課題が山積の状況で、二酸化炭素の排出量削減は先送りとなっている。排出量2位のアメリカは、トランプ政権のアメリカファーストの愛国精神に基づき、経済活動を優先する政策にシフトしていることから、パリ協定からの脱退通告を2019年11月4に発表し、2020年11月4日に正式に脱退する運びである。排出量3位のインドは、経済発展の途上にあるとの立場から、中国と同様に経済成長優先の政策を打ち出している。このようにして、経済成長とその裏腹である二酸化炭素の排出量削減との両立は極めて難しい政治判断を逼ることになっている。世界の二酸化炭素排出量の半分以上を占める上位3カ国をパリ協定の枠組みに誘導すると共に、国連加盟139カ国が一致団結し足並みを揃えて温暖化対策に取り組むために、より影響力（罰則規定）のある枠組みの新設が望まれるところである。

先進諸国では、二酸化炭素の排出量削減と経済成長との両立をはかるべく、再生可能エネルギーの活用が注目されている。太陽エネルギーを起源とする、太陽光発電、風力発電、波力発電、バイオマス発電などの技術開発が中心となり、特に、太陽光発電と風力発電とが将来的にも有望視されている。原子力発電は二酸化炭素を排出しない有効な手段であるが、福島第一原子力発電所の事故を契機に先進諸国では脱原発の流れが主流となっている。我が国のエネルギー政策「第5次エネルギー基本計画」によると、2030年に向けてエネルギーミックスの確実な実現をはかることを挙げている。再生可能エネルギーを22～24%、原子力発電を20～22%、従来の化石燃料による火力発電を56%としている。本基本計画において、化石燃料への依存割合が依然として高いことから、我が国は先進各国を先導する立場ではなく、むしろ、立ち遅れている感が拭えない。経済成長と二酸化炭素の排出量削減との両立が極めて難しいことが、このような数字においても如実に表れている。

他方で、化石燃料からの二酸化炭素の排出量を減らすために我が国は、積極的な研究開発を進めている。CCS：Carbon dioxide Capture and Storage（二酸化炭素回収貯留）は、火力発電所などからの燃焼ガスから効率よく二酸化炭素を回収し、これを地中深くに

埋設して固定する技術である。CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage (二酸化炭素の回収・有効利用・貯留)は、CCS同様に二酸化炭素を回収し、回収した二酸化炭素に水素を添加してメタンなどを合成し、燃料や多種の化学製品の原材料とする技術である。さらに、この技術をカーボンニュートラル(Carbon Neutral)なバイオマス燃料等に適用することで、カーボンポジティブ(Carbon Positive)となり、自ら発生する二酸化炭素の量よりも多くのCO₂を減らすことができる。加えて、カーボンニュートラルな燃料から発生したCO₂を、CO₂フリーな再生可能エネルギーを利用してメタンを合成すること(メタネーション)ができれば、CO₂は二次エネルギーキャリアーとしての循環型社会構築の一翼を担うことが可能となる。いずれにしても、CCSならびにCCUS共に、コスト面からまだ商用化には至っていない近未来の技術である。

つぎに、二酸化炭素への視座を大きく転換してみると、炭素原子(C)1個に酸素原子(O)2個が共有結合した二酸化炭素(CO₂)の起源に纏わる多くの疑問が湧いてくる。太陽系が誕生した46億年前の太古の地球は、高濃度の二酸化炭素で覆われていた。当時の地球は火山活動が極めて活発で、地中から噴き出す水蒸気や亜硫酸ガス(SO₂)および二酸化炭素を主成分とする高温高压の大気が地球を包み込み、大気中には酸素が存在していなかった。そして、40億年前まで時代が下ると原始生命が海中で誕生し、やがて光合成を行うラン藻(シアノバクテリア)などが現れる。さらに、27億年前まで時代が下ると、海中で光合成を行う多様な生物が大量に増殖することにより大気中の酸素濃度が上昇し、大気圏上空でオゾン(O₃)層が形成される。このことにより、地表に降り注いでいた紫外線がオゾン層に吸収されて激減するようになる。

一方、地球が冷えて内部のマントル対流が安定することにより、安定した地磁気が形成されて行く。このマントルは、高温に熔融した導電性の鉄が主成分であり、これが対流することにより電磁力が発生する。この電磁力が地球全体を大きく包み込むバンアレン帯を成層圏で形成し、これがバリアとなって今まで直接地表に降り注いでいた太陽風(電磁波や放射能)ならびに宇宙線が激減して行く。

このようにして、生物にとって極めて有害であった紫

外線ならびに放射線である太陽風と宇宙線の地表への到達強度が著しく減少したことにより、海中から陸上に生物(光合成を行う植物)が進出し、陸地を覆い尽くすようになる。やがて、酸素呼吸を行う動物が出現するが、植物の増大と多様な進化の過程を辿りながら、大気中の二酸化炭素は、産業革命前夜の280ppmにまで低下し、逆に、酸素濃度は21%にまで上昇している。このことから、大気中の酸素の起源は二酸化炭素であると言える。また、化石燃料である石炭は、地球上に生物が出現してから40億年もの長い年月を経て大気中の二酸化炭素が植物体内に取り込まれ、太陽光をエネルギー源とする光合成により有機物(セルロースやリグニン等)を合成し、それが地中深く埋もれて高温高压下で変性したものである。

それでは、46億年前の太古の地球に既に存在していた二酸化炭素の起源は、何処まで遡るのであろうか。46億年前、宇宙にさまようチリがその重力の相互作用により凝集し、太陽を始めとする太陽系の惑星を誕生させた。ゆえに、二酸化炭素(炭素と酸素)は、宇宙にさまようチリに含まれていたことになる。宇宙をさまようチリは、超新星爆発によって木端微塵に飛び散った星(恒星)の破片である。さらに、超新星爆発を起こす星(恒星)の誕生は、今から138億年前、この世の始まりである宇宙創造のビッグバンにまで溯る必要がある。このビッグバンは、想像を絶する超高温高压のエネルギーの塊の状態から、インフレーション理論に基づき宇宙が指数関数的に急膨張して行く現象である。そして、このエネルギーの塊から水素の原子核である陽子が合成されて宇宙に拡散して行く。これは、アルベルト・アインシュタインが提唱したエネルギーと質量とは等価E=mc²(E:エネルギー=m:質量×C:光速²)である特殊相対性理論に裏付けられている。やがて、これらの水素原子(陽子)は、重力の相互作用の影響を受けて凝集して質量が増大して行く。そして、その質量が太陽の8%以上に達すると、自らの重力に耐えきれなくなり水素の原子核の領域にまで相互作用が及び核融合反応が始まる。このときの核融合反応は、原子番号が1である水素(H)4個が核融合して原子番号2のヘリウム(He)1個を生成する。このとき、質量が少し減少する質量欠損が生じ、その質量に等価なE=mc²に相当する莫大なエネルギーが外部に放出される。これが光り輝く恒星の正

体である。核融合で生成したヘリウム原子は、陽子2個と中性子2個から構成され、その質量は水素原子の4倍であることから、重力の影響を受けて恒星の中心部分に向かって沈んで行く。さらに、宇宙からの水素原子がこの恒星に凝集してその質量を増大させて行くと、やがて中心部分に集積するヘリウムは自らの重力に耐え切れなくなり、ヘリウムの原子核相互が接近して核融合を始める。このとき、ヘリウム(He)とヘリウム(He)とが核融合して原子番号4のベリリウム(Be)となり、加えて、このベリリウムにヘリウムが核融合して原子番号6の炭素(C)が生成する。ここで、二酸化炭素の構成元素の1つである炭素が生まれる。さらに、同様にして恒星の質量が増大して行くと炭素(C)とヘリウム(He)とが核融合して原子番号8の酸素(O)が生成する。ここで、二酸化炭素の構成原子である酸素が創出される。そして、酸素(O)と酸素(O)とが核融合して原子番号14のケイ素(Si)とヘリウム(He)とを生成する。

このようにして、ビッグバンにより宇宙に拡散したエネルギーから生成した水素原子が、恒星の重力で引き寄せられて質量が順次増大し、より原子量の大きい原子へと核融合が進んで行く。ちなみに、太陽の8倍の質量まで成長した恒星は、核融合的に最も安定な原子番号26の鉄(Fe)が生成するとそれ以上核融合が進まなくなり、中心部が鉄である白色矮星となり、恒星としての一生が終わる。そして、太陽の8倍から30倍の質量をもつ恒星は、自らの重力に耐えられなくなり超新星爆発を起こす。このときの高温高压のエネルギーがすさまじく、重金属や貴金属を含む鉄以上の原子番号(原子量)の原子がこのときの核融合により生成し、これらが宇宙のチリとなって拡散し、宇宙をさまよう。前述の通り、これらのチリが凝集して太陽系を形成している。このことより、太陽系の惑星には鉄よりも大きな原子番号(原子量)の原子が多く存在する。さらに、太陽質量の30倍を超える恒星は、その想像を絶する強大な重力が原子核の内部にまでおよび、原子核が重力崩壊してブラックホールとなる。ブラックホールは、自らの極めて強い重力により、光までをも引き寄せられてしまうために直接観察することはできない。因みに、太陽は今から123億年後に輝きを失い白色矮星となってその一生を終えると考えられている。

2019年4月11日付けの日本経済新聞によると、日米

欧などの国際共同研究グループが、おとめ座銀河団の中心に位置する巨大ブラックホールの撮影に初めて成功したことを報じている。地球から5,500万光年の距離にあり、その質量は太陽の65億倍にもおよぶ。ブラックホールは、光をもその強力な重力で吸い込んでしまうために直接見ることはできないが、その背面に光り輝くガスが存在すればブラックホールを影として観察できる。また、2019年9月10日の日本経済新聞に、東大と早稲田の研究チームが約135億年前に誕生した銀河を観測したと発表した。138億年前のビッグバンから3億年後の宇宙の様子を観測したことになる。スペツァー宇宙望遠鏡と南米チリのアルマ電波望遠鏡を用いて135億光年離れた銀河から届いた光の波長を解析したものである。

このようにして、二酸化炭素は46億年前の地球創生(太陽系創生)以前から存在し、その起源は138億年前のビッグバンにまで遡るのである。そして、我々人類と二酸化炭素との密接な関係は今後も続いて行くのである。

以上