

1

地球温暖化

18世紀半ばに始まった産業革命において、人類は新しく科学技術による工業文明をつくりだした。この産業革命は、17世紀における自然科学および技術の成立によって用意されたものであるが、科学技術はこれまでの人類の歴史を大きく変化させた。同時に自然環境の破壊が、科学技術の発展にともなって加速されたことはいうまでもない。

地球の気候は大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスで温暖化し、火山活動や工場排煙などからの微粒子、硫酸塩粒子（エアロゾル）で寒冷化する。太陽活動の変動も気候に影響する。

20世紀は人間活動が爆発的に膨脹した世紀だった。19世紀に比して穀物生産は約7倍、鉄の生産やエネルギー消費は約15倍に増大した。16.5億人だった世界人口は、いまや78億7,500万人（世界人口白書2021）を数える。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第1作業部会から第6次報告書が2021年8月に発表された。ここで、温暖化について、「人間の活動の影響によって大気、海洋、陸地が温暖化していることは疑う余地がない」と断言した。過去の報告書は、パーセンテージこそ違うものの、「人間の影響の可能性が高い」という表現に留まっていたが、初めて「疑う余地がない」と断言したのである。

地球の歴史をさかのぼってみれば、恐竜が栄えた中生代（およそ2億5,000万～6,500万年前）の三畳紀～白亜紀末、二酸化炭素濃度は現在の数倍ありきわめて温暖な気候であった。気温はその後、波を打つように上下に大きく変動

してきた。

今、なぜ温暖化が問題なのか、現在起こりつつある温暖化は、人間の活動によりもたらされるものであり、そのスピードがあまりにも速いからだ。

将来、化石燃料に頼らない「脱炭素社会」への移行は不可欠である。それと同時に、資源を有効に使う循環型のシステムを確立し、しかも個人の安全・安心、そして幸福も損なわない総合的な視点で、文明を構築し、持続可能な社会を実現する必要がある。

2017年1月、米海洋大気局（NOAA）は2016年の世界の平均気温は約14.8℃で、観測記録が残る1880年以降で最も高く、20世紀の平均を0.94℃上回った、と発表した。米航空宇宙局（NASA）も独自に集計・分析し、過去最高を更新したことを確認した。

東京大学気候システム研究センターなどのシミュレーションでは、30℃以上の真夏日の数は、現在の年60日前後から、今世紀後半には100日以上が常態化するという。最高気温も2071～2100年の平均は、1971～2000年より3.1～4.1℃上がるとの予測もある。

NASAは1880年からの気温の記録を持っており、それによると世界の平均気温は1970年代から10年ごとに0.2℃のペースで上昇しているという。

1-1 化石エネルギーの消費と温暖化

世界のエネルギーの約84.3%は化石燃料でまかなわれている（「エネルギー白書」, 2021）。その割合は、石油33.1%、石炭27.0%、天然ガス24.2%、原子力4.3%、水力6.4%、新エネルギー・再生可能エネルギー5.0%となっている。その結果、17年の世界全体のCO₂排出量は328億tに達した。おもな国のCO₂排出割合（2017年）は、中国28.2%、アメリカ14.5%、EU9.8%、インド6.6%、ロシア4.7%、日本3.4%となっている。また、国民一人当たりの排出量はカタール、アラブ首長国連邦、サウジアラビア、オーストラリア、カナダ、アメリカが上位を占め、これらは化石燃料産出国である。

日本の温室効果ガス排出量（CO₂換算）は、環境省によると年12億1,300万t（2019年）である。日本の一次エネルギー供給構成（2018年）は、資源エネルギー庁によると、石油37.6%、石炭25.1%、天然ガス22.9%、水力3.5%、

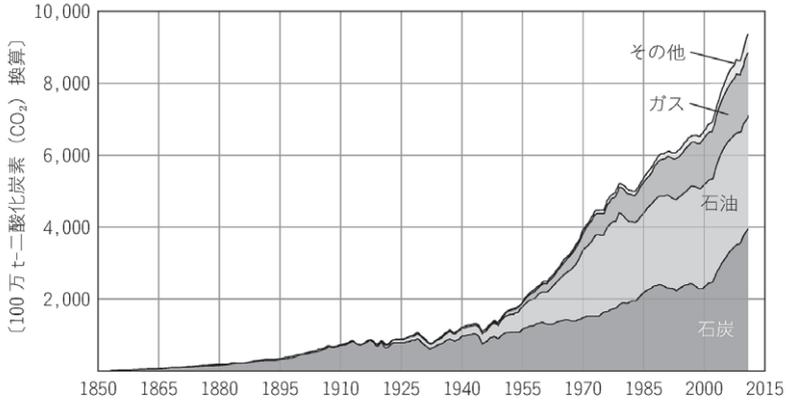
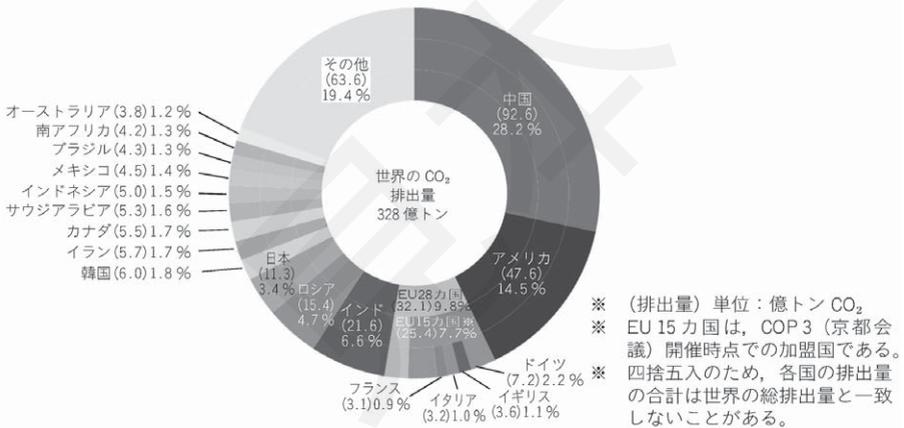


図 1-1 燃料別に見る世界の二酸化炭素排出量の推移¹⁾

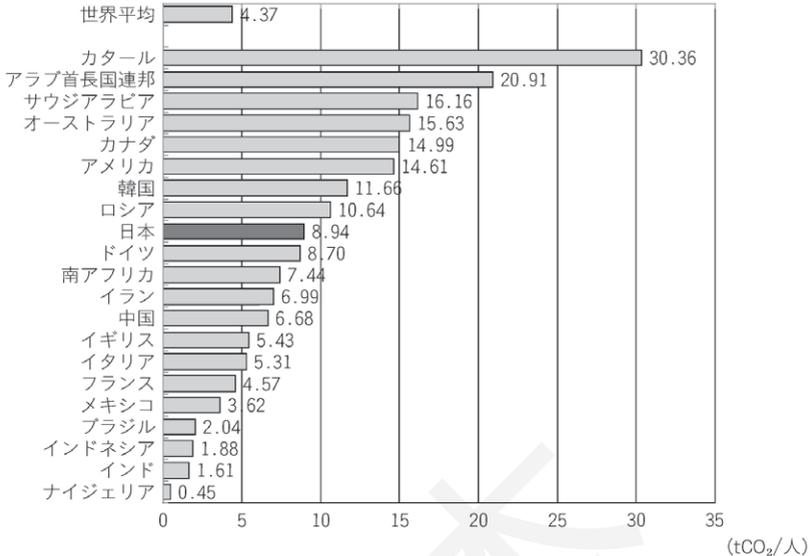


出典：IEA「CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION」2019 EDITION を元に環境省作成

図 1-2 世界のエネルギー起源 CO₂排出量 (2017 年)²⁾

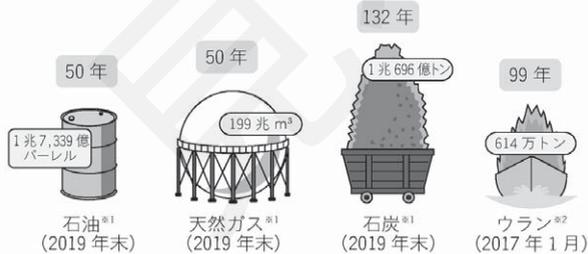
原子力 2.8%となっている。化石エネルギー依存度は 85.5%と非常に高く、エネルギー自給率は 11.8%と他国と比べてかなり低い。

化石エネルギーは資源として有限である。化石エネルギーは、生物が太陽エネルギーのわずか 20 億分の 1 を利用し、数億年かけて営々として作り上げてきたものである。われわれ人類は、この 100 年間に、蓄積速度の 100 万倍という早さでこれを消費し、使い果たそうとしている。いまのペースで消費していくと、今後利用できる年数 (可採年数) は石油 50 年、天然ガス 51 年、ウラン



出典：IEA「CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION」2019 EDITIONを元に環境省作成

図1-3 主な国別一人当たりエネルギー起源CO₂排出量(2017年)²⁾



(注) 可採年数=確認可採埋蔵量/年間生産量
ウランの確認可採埋蔵量は費用130ドル/kgU未満

図1-4 世界のエネルギー資源確認埋蔵量³⁾

99年、石炭132年という試算もある。

化石燃料の消費による大気中の二酸化炭素の増加は、地球の温暖化をもたらす。温暖化の科学的予測には不確かさを伴っているが、過去100年間の気温の観測データは、地球が温暖化してきたことを確実に示している。

IPCC 第5次報告書 (2014年11月)

世界の科学者が最新の研究成果をもとに、温暖化について IPCC はほぼ5年おきに評価報告書をまとめる。2007年には、「人類が引き起こした気候変動に関する知識の普及に尽力した」との理由で、IPCC はノーベル平和賞を受賞した。最新のものは、14年11月に発表された第5次報告書である。3つの作業部会（①温暖化の自然科学的根拠、②温暖化の影響、③温暖化の緩和策）からなり、それぞれの部会が報告書を出した後で、横断的にとりまとめて、長期的展望を加えた「統合報告書」が発表される。今回の第5次報告書では、800人を超える科学者らが無償のボランティアでかわかり、3万を超える最新の科学論文などを検証し、最も確からしいとされる結論を報告書にまとめていった。第5次報告書のポイントは以下のとおりである。

IPCC 第5次統合報告書のポイント

- ・気候システムに対する人間の影響は明瞭であり、近年の人為起源の温室効果ガスの排出量は史上最高となっている。近年の気候変動は、人間及び自然システムに対し広範囲にわたる影響を及ぼしてきた。
- ・温室効果ガスの継続的な排出は、更なる温暖化と気候システムの全ての要素に長期にわたる変化をもたらし、それにより、人々や生態系にとって深刻で広範囲にわたる不可逆的な影響を生じる可能性が高まる。気候変動を抑制する場合には、温室効果ガスの排出を大幅かつ持続的に削減する必要があり、排出削減と適応を合わせて実施することによって、気候変動のリスクが抑制されることとなるだろう。
- ・適応及び緩和は、気候変動のリスクを低減し管理するための補完的な戦略である。今後数十年間の大幅な排出削減により、21世紀とそれ以降の気候リスクを低減し、効果的な適応の見通しを高め、長期的な緩和費用と課題を減らし、持続可能な開発のための気候にレジリエントな（強靱な）経路に貢献することができる。
- ・多くの適応及び緩和の選択肢は気候変動への対処に役立つが、単一の選択肢だけで十分というものはない。これらの効果的な実施は、政策と全ての規模での協力次第であり、他の社会的目標に適応や緩和がリンクされた統合的対応を通じて強化される。

1880年から2012年の期間に世界平均地上気温は0.85℃上昇し、現状のままでは今世紀末に3.7～4.8℃上昇すると予測した。ただし、今後の二酸化炭素排出量によって気温上昇は変化する、という「含み」も持たせ、4つのシナリオ

3

オゾン層の破壊

気象庁は2000年9月10日、南極上空をおおうオゾンホール（オゾン空洞）の面積が南極大陸の2倍以上の2,918万km²に達し、破壊されたオゾン量が9,622万tを記録して過去最大となったと調査結果を発表した。この破壊量は全成層圏オゾン量の約2.9%になるという。オゾンホールが1980年代に初めて出現して以来、これまでの最大の消失量は1998年の8,908万tであった。

オゾンホールは、オゾン層が塩素原子などのオゾン層破壊物質で壊され、極端にオゾンが減っている場所を指す。

2000年は成層圏の気温が低く、極域成層圏雲と呼ばれる雲が発生しやすかったことが原因とされている。この雲があると塩素ガスが増える。塩素ガスは太陽光線で分解され塩素原子ができ、オゾンの破壊が急速に進むと考えられている。国連環境計画（UNEP）と世界気象機関（WMO）は、2014年9月、大気中のオゾン破壊物質が減り、生物に有害な紫外線を遮るオゾン層は、1980年代当時のレベルにまで回復する可能性があると発表した。オゾン層破壊物質の生産と使用を規制するモントリオール議定書に基づいた国際社会の行動が効果に結びついたという。大半のオゾン層破壊物質は議定書の見通しに沿って減少し、1980年代から1990年代前半に進んだオゾン層の破壊は、2000年以後は大きな変化はない。議定書が守られればオゾン層は、2050年までに1980年代の水準に回復することが期待できるという。ただし、あくまで、今出回っているフロンを回収できるという前提がある。

3-1 オゾン層の働きと生物の多様性

地上約 15~50 km にあるオゾン層（成層圏オゾン）は、太陽光に含まれる生物にとって有害な紫外線（可視光線より高いエネルギーを持つ）*を吸収して、地上の生物の生命を守り、生物の進化と多様性をもたらしてきた重要な働きを持っている。オゾン層は中緯度では高度 20~25 km を中心に、厚さ約 20 km、全体で約 33 億 t 存在する。0℃、1 気圧換算でおよそ 3~4 mm の厚さとなる。

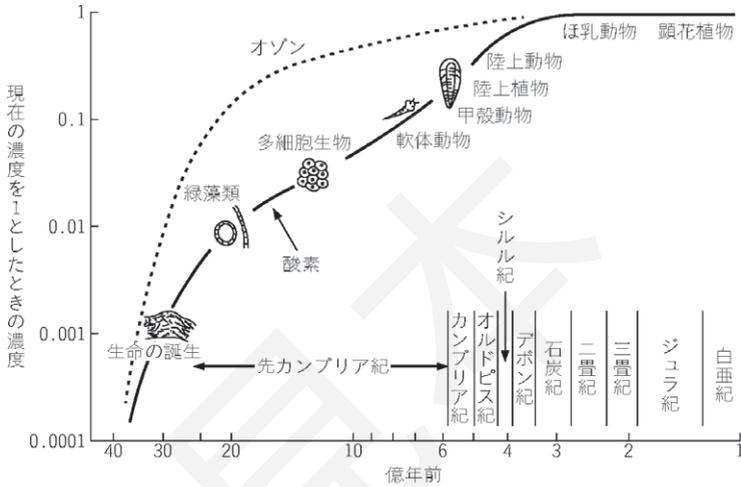


図 3-1 地球における酸素・オゾンの生成と生物の進化¹⁾

* 光（電磁波）が有する光子 1 個のエネルギーは、1900 年プランク（M. Planck）によって示された。

$$\varepsilon = h\nu$$

ここで、 ν は光の振動数を示し、 h はプランク定数と呼ばれる基本物理定数である。

$$\begin{aligned} h &= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ &= 1.59 \times 10^{-34} \text{ cal} \cdot \text{s}, \text{ ただし, } 1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J} \end{aligned}$$

したがって、振動数の大きい（波長の短い）光ほど大きなエネルギーを持つことになる。たとえば、波長 $\lambda = 260 \text{ nm}$ の紫外線のエネルギー（光子 1 モル当たりの）は、次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{光速度を } c &= 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ とすると } \lambda = c/\nu \text{ の関係から, } \lambda = 260 \text{ nm} \text{ のときの光の振動数 } \nu \text{ は,} \\ \nu &= 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / 260 \times 10^{-9} \text{ m} \\ &= 1.15 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

よって、そのエネルギーはアボガドロ定数 (N_A) を $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ とすると

$$\begin{aligned} E &= h\nu \times N_A \\ &= (1.59 \times 10^{-34} \text{ cal} \cdot \text{s}) \times (1.15 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) \times (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 110 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (460 kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) \end{aligned}$$

このエネルギーの値は、生体内の DNA 分子を作っている C-C、C-N などの結合エネルギー値である $82.6 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$ や $72.8 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$ に比べて大きい。

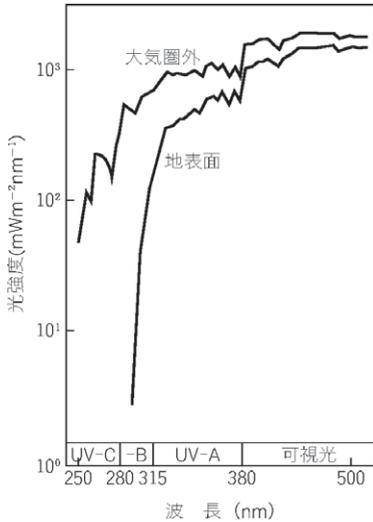
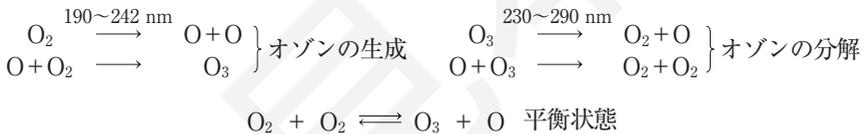


図 3-2 大気圏外および地表面における紫外線の強度³⁾

オゾン層の形成とその働き



結果として、オゾン層は波長 190～290 nm の紫外線を吸収する。生物にとってオゾン層による紫外線の吸収が本質的に重要な理由は、生物の細胞内にある遺伝情報を担う核酸（DNA）を紫外線から防いでくれているからである^{5),6)}。DNA* は、オゾンと同じように紫外線領域（吸収極大波長：250～260 nm）に強い吸収を持っている。

* デオキシリボ核酸（DNA）（deoxyribonucleic acid）

細胞の核に存在する染色体の主要構成要素。遺伝子の本体で、遺伝情報を後の世代（子孫）に伝達すること、タンパク質の合成を通して遺伝情報を発現することを行っている。

DNA の特徴は 4 種類の塩基、アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）およびチミン（T）がひも状に配列した構造にあり、その順序がタンパク質のアミノ酸の並びを決めている。

DNA はリボ核酸（RNA）により酸素をとったという意味であるが、もともとの RNA にはメッセンジャー RNA（DNA の配列を写しとる）、トランスファー RNA（アミノ酸を運んでくる）およびリボソーム RNA（タンパク質の製造工場）がある。

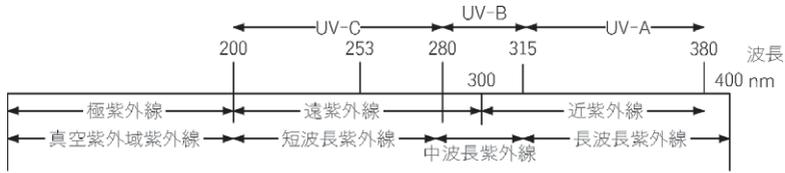


図 3-3 紫外線の区分

表 3-1 UV-B に対する農作物の相互的感受性²⁾

種 類	高い感受性	中間の感受性	耐 性
繊維作物			ワタ
C ₃ 型作物	オオムギ, カラスムギ	イネ, ライムギ	コムギ, ヒマワリ
C ₄ 型作物	スイートコーン	ソルガム	トウモロコシ, アワ
マメ科作物	ダイズ, エンドウ, ササゲ	インゲンマメ, ラッカセイ	ラッカセイ
果菜作物	トマト, キュウリ, カボチャ, オクラ, スイカ, ラズベリー, カンタロープメロン	コシヨウ	ナス, オレンジ
花野菜作物	ハナヤサイ, ブロccoli		アーティチョーク
葉作物	カラシナ, ホウレンソウ	レタス	キャベツ, コールラビー, アルブスクローパー, クローパー, アルファルファ, タバコ
茎作物	ダイオウ, サトウキビ		セロリー, アスパラガス
根, 塊茎	サトウダイコン, ニンジン	ジャガイモ	タマネギ, ハツカダイコン

(注) UV-B 照射実験によりバイオマスが減少するものを「感受性」、コントロールと差異のないものを「耐性」とした。

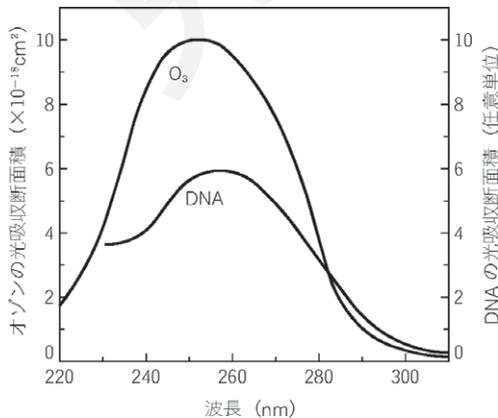


図 3-3 オゾンと DNA の紫外線吸収³⁾

吸収断面積は光吸収の強さを表す。

紫外線の生物への影響 紫外線はその波長により近紫外線 (380～300 nm) および遠紫外線 (300～200 nm), または, UV-A (380～315 nm), UV-B (315～280 nm) および UV-C (280～200 nm) に分けられる。このうち, 地表に到達する成分は 300 nm 以上の長波長成分である。オゾン層が減少して紫外線の増加する成分は 300 nm 近辺であり⁷⁾, 短波長成分は DNA がより吸収するので生物への影響がより深刻になる。人体への影響としては, 皮膚細胞のがん化, アレルギーなどの免疫異常, 目における角膜炎, 白内障の増加などが心配されている。とくに, 赤道直下に住む白人にとって重大な問題となりつつある。

UV-A は皮膚の奥まで (真皮まで) 届き, 肌の弾力を保つ組織を壊しやすく, すなわち, 肌の張りや弾力を保つコラーゲンやエラスチンという組織にダメージを与え, 肌を黒くして, しわやたるみの原因となる。人体への影響が大きいのが UV-B で細胞の DNA を傷つける。肌が赤くなってヒリヒリし, 皮膚の表面に炎症を起し, シミやしわの原因となる。

生物には DNA の傷を修復する働きがあるが, 大量に傷つくと修復が間に合わず, 細胞が死んだり, がん細胞に変化したりする。がん細胞ができてもし少なから免疫系が修復するが, 追いつかなくなると, 皮膚がんになる。動植物への影響としては, 紫外線の強いところに生えている高山植物, 葉の大きい栽培植物, 海面直下のプランクトンなどの生物が影響を受け, 後にこれらが生態系全体への影響を及ぼすことになる。

紫外線防護剤 紫外線を生体高分子への影響の見地から見ると 330 nm を境に区分した方がよい。波長により, 吸収, 散乱物質が異なる性質に対応して, 紫外線防護剤が開発されてきた。330 nm より短波長の紫外線は振動数が高く (エネルギーが高く), DNA による吸収が強いのが特色である。これより長波長の成分はエネルギー的には低く, DNA との相互作用は弱くなり, 転移 RNA, タンパク質などによる吸収が主体になる。

短波長成分が DNA により吸収されるのは, 隣りあった塩基 (主にピリミジン) の間に結合がこの波長領域でできることによる。この異常を受けて, 化学伝達物質 (サイトカイン, プロスタグランジン) ができる。これが刺激となって血流が盛んになる。この結果, 皮膚が紅くなるのを紅斑という。