
2.2

産業革命以降のローカルな環境問題

本節では18世紀から19世紀にかけて拡大した産業革命と、それがもたらした人間活動の変化、そしてその結果として生じた環境問題について概説する。なお、本節は比較的狭い地理範囲で生じた環境問題についてのみ扱い、主に20世紀中盤以降に顕著となったグローバルな環境問題は次節にて解説する。

2.2.1 産業革命とその影響

18世紀に蒸気機関が実用化されると、人間は、化石燃料が持つ化学エネルギーを動力に変換することが可能となった(マクニール 2011)。蒸気機関による動力は、人力や家畜の筋力、水力や風力といった従来の利用可能な動力に比べて、安定的に利用でき、さまざまな場所で使用でき、そして桁違いの力量を持っていた。そのような、化石燃料を用いた動力機械の普及により生じた産業と社会の変革は、**産業革命**と称される。さらに1880年以降に実用化が進んだ内燃機関は、蒸気機関に比べ小型・軽量で、取扱も容易であったため、動力機械の利用可能な場면을拡大させた。たとえば、アメリカのライト兄弟が1903年に世界初の本格的な有人飛行を成功させた飛行機には、ガソリンを燃料とする内燃機関が搭載されていた。これら一連の動力機械の技術的発展と普及は、人間活動の幅と量を一気に拡大した。たとえば、工場制機械工業によって商品の効率的な大量生産が可能となり、それら商品や、また多くの人々が、頻繁に長距離を往来するようになった。

産業革命は、18世紀にイギリスを中心にして始まり、19世紀にヨーロッパ・アメリカ・日本に順次拡大した。産業革命の引き金となったのは、18世紀初めのトーマス・ニューコメンやジェームス・ワットによる石炭を燃料とした蒸気機関の発明と改良である。これら蒸気機関が炭鉱の排水ポンプの効率を高め、石炭

の採掘能力を高めたことで、蒸気機関はそれ自身の利用を急激に拡大させた。さらにエイブラハム・ダービーによる製鉄用コークスの発明も、石炭の熱利用効率を大きく高めた。

産業革命がもたらした蒸気船や汽車などの革命的な輸送手段は、物資の大量輸送を可能とし、都市への産業・人口の集中と工業都市化を急激に進めた（たとえば、湊他 1977）。また産業革命を通じた工業・機械の技術革新の需要を背景に、19世紀は科学技術の発展が著しく、近代科学の基礎はほとんどこの時期に築かれたと言っても過言ではない（3.1節）。

産業革命によりいち早く資本力・軍事力の増強に成功したイギリスを中心とするヨーロッパ主要国は、そのエネルギーと資源の需要の増大を背景に、19世紀にアジア・アフリカ地域で植民地主義を展開した。この時期はまた、人類による地球表層の改変がグローバルに開始された時期であり、特にアジアでは農耕地拡大やプランテーションの展開による森林破壊がすでに大きく進行していた。このような土地被覆改変は、蒸発散変化や地表面のアルベド（太陽光の反射率）や粗度長（地面の空気抵抗を表す指標）の変化などにより、アジアモンスーン気候をすでに変化させていた可能性も指摘されている（Takata et al. 2009）。

20世紀に入ると、ドイツでハーバー・ボッシュ法（7.1節）と呼ばれる大気中の窒素をアンモニアとして固定する技術が開発され、大量の化石燃料エネルギーを前提とした窒素肥料の工業的生産が可能となった。これは土地が肥沃でないヨーロッパでの農業生産を飛躍的に増加させた。その結果、産業革命が始まったばかりの19世紀初頭には2億人弱であったヨーロッパの人口は、20世紀初頭で約4億人、20世紀終わりには6億人近くと、急激に増加した。このような産業構造の変化と人口増加は、ヨーロッパの都市域を中心に深刻な大気と水の汚染をもたらしたが、まだ全球レベルでの環境汚染としては顕在化していなかった。

その後、第一次世界大戦から第二次世界大戦にかけて、途中に世界大恐慌という世界経済の大停滞時期を挟みつつも、近代的な経済活動は欧米諸国から、世界レベルへと拡大した。これには、ヨーロッパの帝国主義国家によるアジア・アフリカ・南米などでの植民地拡大がヨーロッパ人の移民・移動を促したこと、また日本の東アジアにおける経済活動が急速に活発化したことなどに起因している。このような経済の世界的な発展は、同時に環境問題を世界レベルに拡大する結果にもつながった。

2.2.2 スモッグ公害

産業革命以降の人為的環境変化が人間社会にもたらした負の影響は、20世紀中盤頃までは、主に局所的な環境問題、すなわち公害として顕在化した。その1つが、エアロゾル（大気中の微粒子、浮遊粒子状物質）の増加である。もともとエアロゾルは、砂漠の砂の巻き上げなどの自然活動によっても生じるが、人間活動に伴って増加しているのは、石炭・石油などの燃焼や、森林・焼畑などの火災（バイオマス・バーニング）によるものである。特に19世紀以降のエネルギー革命に伴う産業構造の変化は、工業都市の形成、拡大と都市域でのエアロゾル汚染を急激に進行させた。

たとえば、産業革命の発火点となったイギリスにおいては、石炭の燃焼に伴った煤煙による黒い霧であるスモッグ（smog: smoke と fog の混成語）公害が深刻となり、ロンドンでは、1879-80年の冬期のみで約3000人が、スモッグによる肺疾患等により死亡している。その後の煙突排煙規制や工業における燃焼効率の上昇といった努力にもかかわらず、1952年12月4日からの1週間に発生したスモッグ（Great Smog of 1952と称される）は、4000人ももの市民を死亡させ、これを契機として1956年にイギリスでは大気汚染防止法が制定され、以降、ロンドンのスモッグ公害は収束を見せた（マクニール 2011）。しかしスモッグ公害は、現在においても、特に都市や工業が急速に成長した発展途上国（たとえば中国やインド）において、引き続き深刻な被害をもたらしている。たとえば、世界銀行の調査によると、中国には世界の最も汚染された20都市のうち16都市が存在し、大気汚染が主要因とみられる中国国内の死亡者数は毎年75万人に達するという（McGregor 2007）。近年は大気中に浮遊する微粒子のうち粒子径が概ね $2.5\mu\text{m}$ 以下のものをPM2.5と呼び、健康への悪影響が大きいとして注目されている。

2.2.3 光化学スモッグ公害

1940年代にロサンゼルス盆地付近において、目がチカチカする、喉が痛いといった症状を示す大気汚染が発生した（御代川 2003）。この大気汚染は、煤煙や霧などが見えなくとも発生するという、従来の大気汚染にはない特徴を示し、そして晴れた日の昼間に発生した。その後の調査により、この大気汚染の原因物

質は、工場や自動車の排気ガスから発生した窒素酸化物や炭化水素といった一次汚染物質が、太陽光に反応したことにより生じた、**オキシダント**と呼ばれる強力な酸化作用を持つ二次汚染物質群であることが判明した。オキシダントは酸化剤という意味を持つ総称であり、その実体には、オゾン・二酸化窒素・硝酸ペルオキシアシルなどが含まれる。このうちオゾンは0.2ppmといったごく低濃度（現在の大気中CO₂濃度が約400ppmである）であっても、目や鼻の粘膜に影響を与える（御代川 2003）。このようなオキシダントによる大気汚染は、**光化学スモッグ**と称される。光化学スモッグは、日本においては1970年頃をピークに頻発し、例えば1970年7月には東京都杉並区の環状七号線の近くにある高校において、生徒が次々と昏倒する事件が生じている（石 1996）。

2.2.4 酸性雨

1960年代には、ヨーロッパでは、各都市からの硫酸塩エアロゾル(SO₄)、硝酸塩エアロゾル(NO₃)が偏西風循環によって広域に輸送・拡散され、これらが降水に溶け込んで生じる**酸性雨**が大きな問題となった。特にこの酸性雨により、ヨーロッパ各地の都市建築物だけでなく、遠く離れた森林の枯死や、大気汚染そのものの影響は小さかった北欧諸国においても湖沼の酸性化が引き起こされ、湖沼の生態系への影響が深刻になった。1979年、欧州で締結された長距離越境大気汚染条約（ジュネーブ条約）により、ようやくその防止のための対策が始まり、被害は軽減された。しかし近年では東アジアにおいて、特に中国における工業の発展に伴った酸性雨被害が顕著となっている。

図2.2.1は、化石燃料の燃焼によって主に放出される硫酸塩エアロゾル量の変化を示しているが、特に1900年

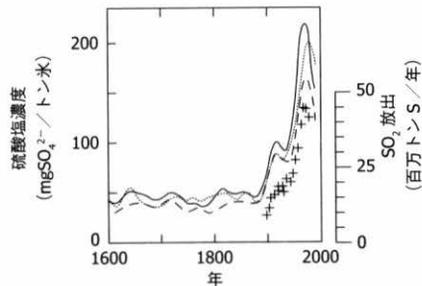


図 2.2.1 グリーンランド氷床に沈着した硫酸塩エアロゾル濃度の時系列変化（線、スケールは左軸）。この変動が、主に工業活動に伴って放出されたエアロゾルに由来することを示すため、米国とヨーロッパから放出されたSO₂量の時系列変化と対比させた（プラス記号、スケールは右軸）。なお、氷床中の濃度変化を示す線からは、大きな火山活動に伴って生じた一時的な値の急上昇は除去してある（IPCC 2001）

代後半に急激に増加していることがわかる。近年、少し減少傾向が見られるのは、先進国による大気汚染規制などによる効果が現れているためである。これらのエアロゾルは、気候環境にも影響を与える。そのメカニズムとは、大気の混濁度を高めて太陽の直達光を遮る直接効果に加え、雲の凝結核となって雲の量を増やして、やはり太陽光を遮る間接効果によるものである。このように、エアロゾルは全体としては地球大気を冷却する効果を持つが、すす (black carbon) などの一部のエアロゾルには、太陽光を直接吸収して大気を暖める方向に働くものもある。

2.2.5 重金属・有機塩素化合物による汚染と生物濃縮

冶金および化学産業が発達した地域においては、排煙や排水、あるいは廃棄物の土壌投棄を通じて、銅・鉛・亜鉛・カドミウム・クロムなどの**重金属**や**ヒ素**による**土壌汚染**が生じた。1880年代に、栃木県の足尾銅山から排出された重金属が、渡良瀬川下流域やその周辺農地に深刻な汚染をもたらした**足尾銅山鉍毒事件** (3.3節)は、広く知られている。また、1955年には富山県の神通川流域で**イタイイタイ病**が報告されたが、それは鉍山廃水により汚染された水田で生産された米などを介して体内に摂取されたカドミウムによる慢性中毒であった (田中 2003)。重金属は土壌中に長期間にわたり滞留するため、それらによる土壌汚染は修復が難しい。渡良瀬川流域の河床堆積物や流域各所の土壌では、現在においても、ヒ素・銅・鉛・亜鉛の汚染が、上流域から下流域までの広範にわたり残存している (神賀・田切 2003)。

カドミウムや水銀などの重金属や、また殺虫剤として広く使用されていたDDD (ジクロロ-ジフェニル-ジクロロエタン) や DDT (ジクロロ-ジフェニル-トリクロロエタン) といった有機塩素化合物は、化学的に安定しており生体内で変性や代謝されず、さらに尿を通じて排出されにくいため、食物を通じて摂取されると生体の脂肪組織などに蓄積しやすい。そのため、これらの物質の体内濃度は、食物連鎖の段階を上がるほど (たとえば植物プランクトン→動物プランクトン→小さな魚→魚食性の大きな魚→人間) 高くなるという**生物濃縮**が生じることで人間に健康被害をもたらす (川口 2012)。1956年に熊本県水俣市にて正式に確認された**水俣病**は、工場の廃液に含まれていたメチル水銀が魚介類に生物濃縮され、これを食べた住民に神経疾患を生じさせたものである。

2.2.6 窒素循環の変化と富栄養化

窒素は、炭素に続いて大きな乾燥バイオマス重量比を占める生体の構成元素である。窒素は、空気の体積の78%を気体窒素(N_2)が構成するなど、対流圏内において豊富な元素である。しかし、この気体窒素は化学的に安定した分子であり、多くの生物は、アンモニアや硝酸塩といった活性窒素しか代謝することができない(川口 2012)。よって、これら活性窒素の利用可能性が、多くの生態系において生物の成長速度を制限する主要要因の1つとなっている。

気体窒素をアンモニアに変換するハーバー・ボッシュ法が20世紀初頭に開発されると、この方法により固定された活性窒素は、化学肥料として世界の農地に散布されるようになった。化学肥料は、特に20世紀後半のいわゆる緑の革命(7.2節)以降、その使用量が急増したために、地球の窒素循環の主要な担い手に人間活動が加わった(7.1節)。活性窒素は容易に水に溶け、耕作地から流出してしまうため、作物の成長における窒素制限をなくすために、作物が吸収できる以上の窒素を散布する傾向がある(ダン 2013)。このような流出した窒素は、特に湖沼や内湾・内海といった水循環が滞る水域において富栄養化を起こし、プランクトンを大量に増殖させアオコや赤潮を発生させる場合がある。このような富栄養化は、しかしながら、都市排水に含まれる窒素やリンが引き起こす場合が多い。近年では、アジア諸国の急速な都市化に伴った富栄養化が顕著となっている(5.3.2小節)。

富栄養化によりプランクトンが異常に増殖した水域においては、そのような増殖した微生物が行う呼吸や、またこれら微生物の死骸が分解される過程において、水中の溶存酸素が消費されるため、**貧酸素水塊**を発生させ、魚類などに大量死をもたらす場合がある。特に養殖漁業は、富栄養化の生じやすい沿岸域において行われるために、被害を受けやすい。また、活性窒素が土壤微生物に酸化されることで生じる一酸化二窒素(N_2O)は、これまでの人間活動に伴って排出された温室効果ガスの中で、 CO_2 とメタン(CH_4)に続く**放射強制力**(大気における温暖化効果, 1.1節)をもたらしており(IPCC 2007)、農作地への大量の窒素散布は、人間活動による気候変動を促進する効果を持つ。

参考文献

- 石弘之 (1996) : 環境保護運動の成立と発展. 梅原猛・伊東俊太郎・安田喜憲総編集, 石弘之・沼田眞編集『環境危機と現代文明 (講座 文明と環境 第11巻)』, 9章, 朝倉書店.
- 神賀誠・田切美智雄 (2003) : 渡良瀬川流域および宮田川流域の河川堆積物と土壌の汚染の現状——足尾銅山と日立鉱山の閉山後の汚染レベル. 地質学雑誌, 109, 533-547.
- 川口英之 (2012) : 生態系の構造と機能. 日本生態学会編『生態学入門 第2版』, 9章, 東京化学同人, pp. 210-226.
- 田中修三編著 (2003) : 『基礎環境学——循環型社会をめざして』, 共立出版.
- ダン, チャールズ (2013) : 化学肥料で“肥沃”になった地球の未来. ナショナルジオグラフィック日本語版, 2013年5月号, 日経ナショナルジオグラフィック社.
- マクニール, J. R. 著, 海津正倫・溝口常俊監訳 (2011) : 『20世紀環境史』, 名古屋大学出版会.
- 湊秀雄・西川治・磯田浩・浜田隆士・横山正 (1977) : 『地球人の環境』, 東京大学出版会.
- 御代川貴久夫 (2003) : 『環境科学の基礎 (改訂版)』, 培風館, pp. 109-110.
- IPCC (2001) : *Climate Change 2001 : the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- IPCC (2007) : *Climate Change 2007 : the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- McGregor, R. (2007) : 750,000 a year killer by Chinese Pollution. *The Financial Times*, July 2, 2007.
- Takata, K., Saitoh, K. & Yasunari, T. (2009) : Changes in the Asian Monsoon Climate during 1700-1850 Induced by Preindustrial Cultivation. *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, www.pnas.org/cgi_do_i_10.1073_pnas.0807346106.