2.1

産業革命以前の環境問題

本節では，人類が 8.5 万年前に世界への拡散を開始してから，18-19 世紀の産業革命に至るまでの間に生じさせた環境問題について概説する．

2.1.1　人類の世界への拡散

約 12 万年前から約 1.15 万年前までの**最終氷期**と呼ばれる時代においては，地球の平均気温は現在よりも 4℃から 8℃ほど低く，北米や北欧には広大な氷床が広がっていた．そして，これらの氷床が膨大な量の水を陸面に固定していたことにより，海水準は現在に比べ低く，約 2 万年前の最終氷期の最寒冷期で最も低く約 140m，最終氷期の終わる 1.2 万年前においても約 70m 低かったと推定されている（大河内 2008）．そのため，たとえば東南アジアにおいては，スマトラ島，ボルネオ島，ジャワ島はインドシナ半島と地続きであり[1]，またユーラシア大陸と北米大陸の間のベーリング海峡は地続きで陸橋を形成していた．このような地理的条件下において，現生人類は拡散を行った．

アフリカの大地溝帯に発生した現生人類が，世界各所に拡散した経路や時期については，世界各地の民族から収集された遺伝子サンプルの系統解析，考古学的

1）この陸塊はスンダランドと呼ばれ，その面積はインドの 2 倍にも達した．また当時，オーストラリア大陸とニューギニア島も地続きであった．スンダランドとオーストラリア大陸の間は多くの島嶼が点在しており，これらの島伝いにオーストラリア大陸に移住することは，たとえ航海技術が未熟であっても可能であったと想像される．なお，当時のスンダランドと当時のオーストラリア大陸との間には，ウォレス線，またはウェーバー線と呼ばれる動物種組成の大きな断絶が存在するが，これはこの地理的な障壁の両側において，それぞれ独自の進化が起きた結果である（Holt et al. 2013）．

資料，さらにいつ拡散の機会が開け閉じたかを示す気候記録を総合的に用いることで，かなり詳細な推定が行われている（オッペンハイマー 2007）．それによると，アフリカ大陸以外の全ての現生人類は，約 8.5 万年前に紅海を渡ったごく小さな集団の末裔とされる．ある推計では，その移動は，ただ一度のみ，わずか 150 人ほどの集団で行われたという（ウェイド 2007）．紅海を渡った人類は，インド洋沿いに東へ分布を拡大し，東南アジアを経て，約 6.5 万年前までにはオーストラリア大陸に到達したようである．

このインド洋沿いルートによる人類の拡散は速やかに行われた一方で，当時厳しい寒冷気候にあったユーラシア大陸内部における拡散は，より長い時間を要した．ユーラシア大陸全域に満ちた人類が，ベーリング陸橋を通って北米大陸に到達したのは，2.5–2.2 万年前頃と推定されている．その後，最終氷期の終わりにロッキー山脈の東側に生じた氷河の切れ目，いわゆる「無氷回廊」を抜けることで南下に成功し（太平洋岸沿いのルートを南下したという説もある．関 2012），約 1.2万年前にはチリ南端に到達，ついに南極大陸を除く主だった陸地の全域に人類は拡散した．

2.1.2 人類の拡散に伴う大型草食動物の絶滅

言語を介した高度なコミュニケーション能力，そして弓や投槍器のような道具を駆使する人類は強力な狩猟者であり，人類が進出した地域の動物相に，大きな影響を与えた（表 2.1.1）．たとえば，オーストラリア大陸においては，人類到達以前には，有袋類，単孔類，鳥類，爬虫類に属する 20 属かそれ以上の大型獣が生息していたが，これらはすべて，オーストラリア大陸に人類が到達した後の約

表 2.1.1 過去 10 万年間に絶滅した陸上大型動物（成獣の体重が 44 kg 以上）の属の数（Wroe et al. 2006）

地域	絶滅属数	現存属数	合計属数	絶滅率（%）
オーストラリア	19	3	22	86.4
南米	46	12	58	79.6
北米	33	12	45	73.3
ヨーロッパ	15	9	24	60.0
アフリカ	7	42	49	14.3

4万年前までに一斉に絶滅している．オーストラリア北東部において採集された沼地土壌コアを用いて，糞生菌[2)]の胞子量の増減を調べた研究によると，大型草食動物の生物量は，約12万年前と7.4万年前に生じた大きな気候変動に対してはほとんど変化しなかったものの，比較的気候の安定していた4.1万年前に激減したことが示されている（Rule et al. 2012）．またこの地域から発見された人類活動を示す考古学的資料の推定年代は，最古のもので4.9万年前であり，それらは4.0万年前までにかけて拡大している．こうした事実から，この生物量の激減は人類の狩猟圧によるものと考えることが，最も合理的である．また，このような大型獣の絶滅は，乾燥地帯であるオーストラリア内部や，多湿地帯のオーストラリア南東部でも同時期に生じており，このことも，この一斉絶滅における気候変動の関与を否定している．

これら大型草食動物は，地表面の草本を摂食することで，山火事の発生頻度を下げるという機能を果たしてきた．先の沼地土壌コアの記録によると，4.1万年前に糞生菌の胞子量が激減した直後に，炭質粒子量とイネ科草本の花粉量とが急増している．これは，これまで大型動物によって食べられていた草本が残存するようになり，これが燃焼の拡大を助けることで山火事の頻度が急増したことを示している．このような自然発生による山火事の増加と，おそらくは人間による野焼きも手伝い，元々この地域を広く覆っていた雨緑樹林（乾季に落葉し，雨季に葉をつける樹木林）は徐々に姿を消し，山火事に適応した生理的特性を持つ硬葉樹種（ユーカリなど）から構成される森林へと置き換えられていった．

北米大陸においては，マンモス，マストドン，地上性ナマケモノといった大型動物が，狩猟民族クローヴィス人の到達後まもない1.2–1.0万年前にかけて絶滅した．ただし，この絶滅の主要因の1つは，気候変動であると考えられている．なぜならば，アメリカ北東部における湖の堆積物に含まれる糞生菌胞子の記録から，これらの大型動物群は，クローヴィス人が到達する以前である1.4万年前頃に生物量の急激な減少が生じ，そのまま絶滅まで回復しなかったことが推定されるからである（Gill et al. 2009）．この時期は，ベーリング・アレレード期と呼ばれ，一時的に温暖な気候が生じていた．しかし，北米では肋骨の間にクローヴィ

2）糞生菌は，草食動物の糞においてのみ胞子形成を行う菌類である．その胞子量は，特に大型草食動物の活動による影響が大きいことから，大型草食動物の生物量の良い指標となる．

ス型槍尖頭器が刺さるなど，明らかに人によって狩られた形跡のあるマンモスの骨が多く見つかっていることから，少なくとも，これら衰退に向かっていた大型動物の絶滅を人類が早めたことは確実といえよう（ダイアモンド 2000）.

2.1.3 農業と文明の勃興

地球軌道要素の周期的変動の影響で，最終氷期の寒冷気候がやや緩むと，大気中の温室効果ガスが増加して，この微細な変化を増幅した．温暖化が進むにつれて，北米と北欧の巨大氷床が解け**アルベド**（太陽光の反射率）が減少し，それがさらに大気を暖めた（アイス・アルベドフィードバック，1.1 節）．このようにして 1.15 万年前には最終氷期が終わり，現在の間氷期（**完新世**と呼ばれる）が始まった．完新世は，少なくとも過去 42 万年間において，最も長期にわたって気候が安定した時期の 1 つである．

この完新世の温暖で安定した気候環境に育まれ，人類は文明を発達させてきた．約 1 万年前には，イラン西部のザグロス山脈の山麓地帯において，雨水に頼る**天水農業**が始まっていた（小林 2005）．約 7000 年前には，メソポタミア南部のバビロニア地方（現在のイラク南部）の乾燥地帯にシュメル人が定住し，**灌漑農業**を始めた．栽培されていたのは主に大麦であったが，小麦やアワなどの穀類，またタマネギやニンニクなどの野菜類も作られた．現在，世界各地で最も利用されている栽培植物の原種は，元々この地域に自生していたものが多い（ダイアモンド 2000）．また，牛，豚，羊，ヤギの原種も，この地域に生育していた．これらの栽培植物，または家畜化された動植物は，採集生活をやめて農耕牧畜を始めた人々に，穀物，野菜，ミルク，動物繊維などの多様な生活資源を提供し，さらに輸送や耕起の効率的な手段までも与えることになった．そして農業がもたらした余剰食糧は，シュメル人社会が農民以外の職業を持つことを可能にし，支配階級，専門職人，商人といった職業の分化が生じた．これら専門職への給与はほとんど大麦で支払われたが，このような実質的な通貨が誕生したことで，より複雑な社会の形成が可能となり，約 5000 年前までには最古の都市文明が勃興した．

2.1.4　農業に伴う環境問題（1）——塩害

シュメル人は行政や経済に関わる膨大な記録を粘土板に残したため，その社会の様子は詳しく判明している．それによると，主要な穀物生産地域における大麦の収量倍率（一粒の種籾が何倍になるかの倍率）は，紀元前2350年には76倍に達していたが，その約250年後には，この値は約20倍にまで下がってしまった（岸本他 1989）．この時代において，食料生産力は国力そのものである．農業生産の大幅な低下はシュメル人社会を衰退させ，紀元前2000年頃には周囲の遊牧民族の襲撃に対抗できなくなったことで王朝の崩壊を招き，人類最古の文明を拓いたシュメル人は，その後，歴史の表舞台に上がることはなかった．

シュメル文明末期に大麦の収量倍率が低下した理由は，灌漑農法に伴う土壌表層の塩類濃度の増加，すなわち**塩害**[3]であったと考えられている（小林 2005）．バビロニアは高温かつ乾燥した気候であり，現在のイラク平野部においては，7，8月の日中には気温がしばしば50℃にも達し，そして年降水量は約150mm以下であり，農耕を行うためには灌漑は不可欠であった．そこでこの地域では，雪解け水の氾濫によってユーフラテス川から溢れた水を運河を通じて溜め池に蓄え，作物の成長期である夏季に溜め池から畑に灌漑を行う農法を行っていた．しかし，十分な排水や休耕を伴わない灌漑は，塩害を引き起こすことがある．なぜならば，半乾燥帯においては，土壌深層に塩化ナトリウム，硫酸ナトリウム，硫酸カルシウム，硫酸マグネシウムといった塩類が集積していることが多く，そのような土壌層に灌水が到達すると，塩類が溶け，地表の乾燥に伴って毛細管現象によって吸い上げられることで，地表面に析出してしまうからである．また，乾燥地帯を流れるユーフラテス川の水は塩類を多く含有しており，これもバビロニアの農地に塩害をもたらした．

塩害は，過去の環境問題では決してない．20世紀後半にソビエト連邦は，無

3）土壌の塩類濃度が高くなると，土壌水の浸透圧が増加する．植物の根は浸透圧の差を利用して吸水しているので，そのような土地では，植物の根の吸水機能の低下が起きる．さらには，たとえば土壌水のカルシウム濃度が高くなると，カリウムの吸収率が妨げられるといった，養分元素の吸収に関する拮抗作用も生じることで，生育障害が生じる（久馬 2005）．このような塩害が生じた土地を回復させるためには，大量の水を用いて湛水と排水を繰り返すことが基本であり，豊富に水の使えない地域においては困難な場合が多い．

謀な灌漑計画のもとで，約7万 km^2 にも及ぶ広大な綿花地帯を中央アジアに作り上げた．これは九州と四国を合わせた面積を上回る．当初こそ計画通りに大量の綿が収穫され，ソ連は綿を自給できるようになったばかりではなく，世界第2位の綿の輸出国とまでなった．しかし，やがてウズベキスタンの綿花地帯の半分，トルクメニスタンの8割までもが塩害の影響を受けるに至り，綿花の生産量は落ち込んだ．さらに，灌漑のための取水が河川流量を減少させたことで，アラル海に大幅な面積の縮小と，塩類濃度の増大をもたらし，周辺域の生態系を壊滅させるに至った（マクニール 2011）．また塩害は，灌漑以外の人為的要因によっても生じる場合がある．タイ東北部においては，その面積の2割程度に塩害が生じていると推定されている．これは，この地域で20世紀後半に行われた大規模な森林伐採によって，蒸散量が激減したことで地下水位が上がり，低位面の地表に塩類の析出をもたらしてしまったためである（三浦・タルサック 1991）．

2.1.5 農業に伴う環境問題（2）——植生伐採と土壌流失

農業は，**土壌流失**と，それに伴う農業生産力の低下という，他の環境問題を引き起こす場合がある．なぜならば，作物が農地を覆うのは一年の限られた期間だけなので，むき出しとなった土壌が風雨にさらされて，浸食が加速するからである（モントゴメリー 2010）．特に斜面の場合には，むき出しの土壌は植被で覆われた同等の土壌の1万倍以上の早さで浸食が進む場合すらあるという（太田 2012）．また，耕作を続けると，落ち葉などの有機物の土壌への供給量が減ることに加えて，酸素が土壌深くまで入り込みやすくなることによって，土壌有機物が減少する．土壌中の有機物は，浸食への耐性をもたらす効果を有しているため，一般に長く耕作を続けるほど土壌流失は生じやすくなる．

土壌中の有機物が土壌浸食への耐性をもたらすのは，そのような有機物を摂食する土壌生物が土壌粒子を固まりとしてまとめ上げるからであり，そのメカニズムは，菌糸による縛着，細菌から分泌される多糖類による接着，またミミズが有機物を土壌と一緒に摂食し消化管を通過する過程における機械的圧縮などが含まれる（久馬 2005）．また，このような土壌生物の働きは，土壌に空隙を豊富に作ることで，土壌の透水性と保水力を増やし，土壌を降水に対して飽和しにくくさせる．そのために，地表面を水が流れるような状況を減少させ，これも土壌流失

の防止に大いに寄与している．

土壌が風や水によって他の土地から運び込まれるケースや，火山からの降灰があるケースを除けば，土壌の厚さは，母岩の風化による土壌生成速度と，流失速度とのバランスによって決定される．ある推定によれば，世界の陸地において1 ha あたり土壌生成速度[4]は平均570 kg/年である．これは厚さにすると0.057 mm程度であり，10 cm の表土ができるまでには1750年が必要となる（久馬 2005）．このように土壌の生成とは千年単位の時間を要する事象であり，よって一度土壌を流失させてしまった農地が自然回復することは，人間社会の時間尺度においては望むことは難しい．

このような土壌流失とそれに伴う農業生産力の低下という環境問題は，農業がさまざまな地域に拡大するにつれ，顕著となってきた（モントゴメリー 2010）．例えば，完新世に入ってからのギリシアでは，草原からオークの森林へと植生が変わり，数千年かけて厚い土壌が形成されていた．しかしこの地に，広範囲におよぶ耕作と放牧が開始されると，土壌は速いペースで谷へ海へと流されていった．握り棒を使った局所的な天水農業から，景観全体を切り拓いて鋤で耕す大規模な農業への移行は，この土壌流失に拍車をかけた．古代ギリシア人は農業に伴った土壌の浸食を抑えるために，土壌に有機物を補給し，また斜面の農地を階段状にした．それでも，アテネ市周辺の丘陵地帯は，紀元前600年頃にはすべてはげ山となり，市への食糧供給に困難を生じさせた．これら農業に伴った土壌の衰退は，その後のローマ帝国においても繰り返され，結果的に西洋文明の中心地を，メソポタミアからギリシア，ローマ，さらに西方へと突き動かす役割を果たした．

このような，植生破壊と土壌流失が文明にもたらした致命的な影響は，世界各所でしばしば生じたが，とりわけ広く知られているのは南太平洋のイースター島の事例であろう（ダイアモンド 2005）．遺物（人が食べたネズミイルカの骨）の放

4）土壌は岩石（母岩）の風化により生じるが，その風化は単純な物理化学的な作用ではなく，生物学的な作用に強く依存している（久馬 2005）．すなわち，植物の根の呼吸や土壌生物の呼吸により，土壌中に CO_2 が排出され，これらが土壌水に溶けて酸性を持ち，それにより母岩を溶解させるのである．また植物は，粘土や腐植のマイナス荷電によって保持されている NH_4^+ や K^+ などの陽イオンを遊離させて吸収するために，根から有機酸を分泌することでイオン交換を行っており，これも土壌水の酸性度を高める．さらに，根が母岩の亀裂を力学的に押し広げることによっても，母岩の風化は促進される．

射性炭素測定などから，遅くとも 10 世紀までにはイースター島に移民がたどり着いたと推定されている．堆積物中の花粉記録から，人が移住する前のこの地は，亜熱帯林によって覆われていたことがわかっている．移住後，人口は順調に増加し，巨大石像の建造が始まるなど独自の文明を発達させてきた．その間，耕作に加え，木材や燃料を得るための森林伐採が進行し，これに伴って土壌流失も加速していった．人口が 1 万 5000 人前後と最大になった 15 世紀初頭に森林伐採は最盛期を迎え，そして 15 世紀初頭から 17 世紀には森林はほぼ姿を消していた．そして 17 世紀後半には，食糧不足を背景として部族間で争いが頻発し，この頃には食人までも行われた痕跡が残っている．太平洋上の孤島であるイースター島では，環境が劣化しても移住は可能な選択肢ではなく，そもそも冒険的な航海を試みようにも，舟を作る材料となる木材は既に残っていなかったと思われる．かくして，18 世紀にヨーロッパ人が島を発見した時には，人口は 2000–3000 人にまで落ち込み，島の文化も破壊されていた．現在においても，イースター島には，薄い土壌の上に貧弱な植生が広がっている．

このような不適切な農業に伴う土地の荒廃や土壌流失は，近世のアメリカ南部において，きわめて速いペースで生じた（モントゴメリー 2010）．アメリカにおける初期の植民地経済は，イギリスへのタバコ輸出に強く依存していた．タバコは，大西洋を渡る長い航海にも耐え，またその高い運賃に見合うだけの利益をもたらす生産物だったからである．しかし，タバコは代表的な食用作物の 10 倍以上の窒素と，30 倍以上のリンを土壌から奪う．そのため，肥料を投入しない当時の収奪的農法においては，新たに開拓した土地であっても，5 年間栽培を続けるとその土地には何も育たなくなった．植被を失い，土壌がむき出しとなった土地が放棄され，そのような土地では夏の激しい雨が降るたびに，大量の表土が河川へと押し流されていった．適切な管理を行わずに斜面を開墾したことも，土壌流失に拍車をかけた．北米大陸において，このように収奪的な農業が行われたのは，ヨーロッパから新大陸にもたらされた様々な病原菌（天然痘・麻疹・インフルエンザ・チフス・ジフテリア・おたふく風邪・百日咳・ペストなど）によって先住民社会が壊滅的に縮小したためであり，弱体化した先住民を駆逐しながら，新たな土地を得ることが容易であったためである．

農業は必ずしも土壌を疲弊させる非持続的な営みではない．たとえば，定期的な洪水に依拠した農業が行われていたナイル川流域や，水田農法が行われている

表 2.1.2　現在における世界主要河川の土壌流入量．土壌流入量は観測値，浸食速度は，1 m^3の土壌重量を 0.5 トンと仮定して計算した（御代川 2003）

河川	集水域面積（$10^3 km^2$）	土壌流入量（10^6トン／年）	浸食速度（mm ／年）
黄河（中国）	752	1866	5.0
ガンジス（インド）	1480	1669	2.3
アマゾン（ブラジル）	4640	928	0.40
インダス（パキスタン）	305	750	4.9
長江（中国）	180	506	5.6
オリノコ（ベネズエラ）	938	389	0.83
エーヤワディー（ビルマ）	367	331	1.8
マグダレナ（コロンビア）	240	220	1.8
ミシシッピー（米国）	327	210	1.2
マッケンジー（カナダ）	1800	187	0.21

中国の長江流域のように，持続性の高い農業システムを有していた地域においては，現在に至るまで盛んに農作物が生産され，その結果として，これら地域における文明も長く持続した．このように，文明が持続する条件を数千年スケールで俯瞰すると，少なくとも産業革命以前においては，持続的な食料生産こそが，その基本的条件の 1 つと言うことができるだろう．しかし，土壌流失もまた歴史時代だけの環境問題では決してない．表 2.1.2 は現在における世界主要河川への土壌流入量と，各河川の集水域面積，それらから推定した土壌浸食速度である．この表の地域において，先に示した土壌生成速度（0.057 mm/年）をはるかに上回る土壌流失が生じていることがわかる．

参考文献

ウェイド，ニコラス著，沼尻由起子訳（2007）『5 万年前――このとき人類の壮大な旅が始まった』，イースト・プレス．
大河内直彦（2008）：『チェンジングブルー――気候変動の謎に迫る』，岩波書店．
太田猛彦（2012）：『森林飽和』，NHK ブックス．
オッペンハイマー，スティーヴン著，仲村明子訳（2007）：『人類の足跡 10 万年全史』，草思社．
岸本通夫・富村伝・山本茂他（1989）：『世界の歴史 2 古代オリエント』，河出書房新社．
久馬一剛（2005）：『土とはなんだろうか？』，京都大学学術出版会．
小林登志子（2005）：『シュメル 人類最古の文明』，中央公論新社．
関雄二（2012）：最初のアメリカ人の探求．印東道子編『人類大移動――アフリカからイースター島へ』，3 章，朝日新聞出版，pp. 61-82．
ダイアモンド，ジャレド著，倉骨彰訳（2000）：『銃・病原菌・鉄――1 万 3000 年にわたる人

類史の謎』，草思社.
ダイアモンド，ジャレド著，楡井浩一訳（2005）：『文明崩壊——滅亡と存続の命運を分けるもの』，草思社.
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.
三浦憲蔵，サブハサラム・タルサック（1991）：東北タイにおける森林破壊による土壌の塩類化と植林による防止対策．土壌の物理性，63，1-59.
御代川貴久夫（2003）：『環境科学の基礎（改訂版）』，培風館.
モントゴメリー，デイビッド著，片岡夏実訳（2010）：『土の文明史』，築地書館.
Gill, J. L., Wiliams, J. W., Jackson, S. T., et al. (2009) : Pleistocene Megafaunal Collapse, Novel Plant Communities, and Enhanced Fire Regimes in North America. *Science*, 326, 1100-1103.
Holt, B. G., Lessard, J. P., Borregaard, M. K., et al. (2013) : An Update of Wallace's Zoogeographic Regions of the World. *Science*, 339, 74-78.
Rule, S., Brook, B. W., Haberle, S. G., et al. (2012) : The Aftermath of Megafaunal Extinction : Ecosystem Transformation in Pleistocene Australia. *Science*, 335, 1483-1486.
Wroe, S., Field, J., Fullagar, R., & Jermin, L. S. (2006) : Megafaunal Extinction in the Late Quaternary and the Global Overkill Hypothesis. *Alcheringa*, 28, 291-331.