

メタ災害論のすすめ

池田安隆

奈良大学文学部地理学科

An introduction to the meta-science of disaster

Yasutaka Ikeda

Department of Geography, Nara University

Abstract

In this paper, an attempt is made to get a geo-historical perspective on the present-day environmental crises in the context of coevolution between life and the earth. Throughout the Neogene, terrestrial megafauna as a whole including hominin have been almost fully utilizing biological resources in a sustainable fashion. In the Late Pleistocene, *Homo sapiens* globally dispersed by hunting large herbivores, and finally has eaten most of them. After that, *Homo sapiens* turned himself into a herbivore and began to cultivate the lands that had hitherto fed the extinct large herbivores. After ~10,000 years of stagnant life as farmers, *Homo sapiens* dramatically increased its population by introducing Nitrogen-fixation techniques using a large amount of fossil energy every year. Furthermore, he created genetically-modified, higher-yielding grain crops for animal feeding that can consume a plentiful of Nitrogen fertilizer and herbicide, and thereby turned himself into a carnivore again, resulting in the present-day environmental crises. The limit of human population that could survive on the earth in a sustainable fashion is likely as low as that before the industrial revolution.

1. はじめに

本稿は、京都大学防災研究所地震火山研究グループの例会（2021 年 7 月 30 日）において行った、「虚学の精神：Everything you always wanted to know, but were afraid to ask, about Armageddon earthquakes」という妙なタイトルの講演をもとに書いた。この講演の要旨を以下に引用する：

“過去半世紀の間に、日本の大学における実学偏重は益々激しくなった。実学とは現行の社会体制や価値観を前提とする営為である。しかし我々の社会は、超巨大地震などの自然災害や戦争に代表される人為災害によって、数十年に一度ぐらいの頻度でこの前提を覆すような大変革を経験してきた。こうした大変革の後に来るべき新たな社会体制や価値観を構築するための種となるのは「虚学」(= pure science) であり、それを醸しておく場は大学しかない。超巨大地震サイクル研究を例に、大学における研究のありかたを考えてみたい。”

この講演の後半部分，“超巨大地震サイクル研究と大学における研究のありかた”については、既に別稿で論じた（池田，2021）。本稿では、講演の前半部分の中から、大学における災害研究に関する問題について論ずることとする。

本論に入る前に、私が自らの狭い専門とは離れたこのような問題を考えるようになった経緯を説明しておこう。東大に入学したばかりで何を専攻しようか未だ迷っていた頃「虚学の精神、あるいは学問の没意味性について」と題するエッセイ（堀米, 1969）を読んで深い感銘を受けた。米国において公民権運動とベトナム反戦運動に端を発した学生運動は世界に波及し、日本では全共闘運動へと変化していった。1969年には、安田講堂に立てこもった全共闘学生を排除すべく東大総長が機動隊出動を要請した。これは、学問の自由とそれを支える大学の自治という新制大学の理念を覆す象徴的な出来事であった。このエッセイの著者・堀米庸三氏は執筆当時（1969年）東大文学部長であり、学生との団体交渉の矢面に立っていた。そのような時代背景のもとで学問の意味を問い、それに極めて真面目に答えたこの珠玉の論考のなかで、「虚学」という言葉は説明無しで用いられていた。虚学とは実学の対極に位置する学問群の総称（= pure science）であるが、現在では死語と化している（池田 2015）。言葉が消えると言うことは、それに付随する概念がなくなることを意味する。日本の大学における実学偏重の流れは今日止めるすべも無い程に激しくなっている。その端緒となったのは1960年代末の学生運動であるが、1990年代から始まった「大学改革」と国立大学の法人化（たとえば、大崎, 1999, 2001）とによって実学偏重や産官学共同へと向かう大学の変容が一気に進んだ；これに伴って虚学という概念が世の中から無くなったらしい。私は2000年から2017年頃まで地震予知連絡会の委員や原子力安全委員会の耐震安全性審査関係の委員を務め産官学の繋がりを垣間見てきたこともあって、地震学とその関連分野で起こったこの種の変容とその副作用とを別稿で紹介した（池田, 2021）。かつては虚学であった地理学も例外では無く、こうした流れの中で妙な具合に変容してきた。

東大大学院時代の私の指導教官は、理学部地理学教室の吉川虎雄先生であった。学部学生時代に受講した吉川先生の講義の中で今でも印象に残っているのは、南海トラフの巨大地震サイクルに関する研究であった。吉川虎雄、貝塚爽平、大田陽子等の地形学者は、室戸半島に発達する海成段丘の研究に基づき地質学的隆起速度を推定し、その結果と測地的に観測された南海（1946年）・東南海（1944年）地震とその前後の隆起・沈降データとを比較した（Yoshikawa, Kaizuka & Ota, 1964; 吉川, 1968）。この研究は、沈み込み帯における巨大地震発生サイクルと地質学的時間スケールで起こる島弧の変形（造山運動）とを統合的に説明しようと試みた画期的な研究であった。私はその後、断層運動に伴う地表変形や活断層の浅部地下構造の探査等を専門に研究してきたが、最終的には東北日本弧における地殻歪の蓄積過程と沈み込み帯における超巨大地震の研究に行き着いた（池田, 1996, 2021; Ikeda, 2014; Okada & Ikeda, 2012; 池田・岡田・田力, 2012）。吉川先生は弟子の研究にあれこれ指図をするタイプの学者では無かったが、私の超巨大地震研究は図らずも吉川先生の南海トラフ研究の延長線上に乗っていた（乗せられていた）ことになる。

科学は人の精神を活性化させ、知ることの喜びを与えてくれるものであると、学生時代の私は信じていた。専門的な研究に携わるようになると、楽しいことばかりではないことがすぐに分かったが、それでも何年かに一度巡ってくる目から鱗が落ちるような発見がこれを帳消しにて尚余りあった。誤解を恐れず正直に告白すると、沈み込み型造山帯における地殻歪の蓄積／解放過程を研究した一研究者にとって、2011年の東北地震は文字通り千載一遇の血の騒ぐような地質イベントであった。地質学的時間スケールで見ればほんの一瞬に過ぎない自分の一生の中で、この地震に巡り会ったことを幸運であるときさ感じた（池田, 2016）；二万人以上の人々の命を奪った地震であるにもかかわらず、地球科学の分野でも実学化の勢いには抗しがたいものがある。私自身、地震予知・地震防災に関わる研究プロジェクトや原子炉の耐震安全性審査など、実学的仕事が1990

年代末頃から急増した。しかし学生時代に刷りこまれた教育の影響は抜きがたく、多少の後ろめたさを感じながらも、芸は売っても魂は売らないという虚学者の矜持は守ってきた；学問の社会的意味を問われる今日の風潮も、虚学が何の役に立つかと問うこと自体一種の自己矛盾であると看過してきた。しかし、2011年3月11日に東北地方を襲った超巨大地震は、研究者としては千載一遇の地質現象であったが、一方で虚学としての地球科学の社会的意義を考えさせられるきっかけとなった（池田, 2015, 2016）。

2017年春に奈良大学に赴任した当初は、学生に何を教えるべきか大いに迷った。自分の狭い専門を中心に教えることは論外である。ましてや昨今マスコミに登場するよろず災害に詳しいなんとか先生よろしく、時流に乗って小手先の防災技術を教育したり研究したりすることが地理学を志す大学人の役割とは決して思えない。実学的災害研究は、人類の生命・財産を守るという当為に発する学問であるから、当為そのものの妥当性を検証することはない。一方、本稿でこれから述べるように、人類と自然災害との関わりは複雑であり、洪水は防げば良い、火山は避ければ良いと一概には言えないのである。さらに一般化すれば、すべての実学は現行の社会体制や価値観を前提に行う営為である。ところが、我々の社会は戦争や巨大災害によって数十年に一度ぐらいの頻度でこの前提を覆すような大変革を経験してきた。こうした大変革の後に来るべき新たな社会体制や価値観を構築するための種となるのは虚学であり、それを醸しておく場は大学（しかも無い）であろう。というわけで、私が担当を任された自然地理学系の科目群は、人間を取り巻く自然環境についての諸問題を考える上で基礎となる知識と思考法とを、なるべく系統的に身につけられるように構成すべきであるとの結論に至り、半期5コマの講義科目を使ってこれを実現すべく講義ノートを作り始めた。そして、これら5コマの総論編を二年次の後期に開講する「災害地理学」と位置づけた。講義ノートがようやく完成するまでに赴任後三年間を費やしてしまった。

ここで誤解を招くことの無いよう少し付言しておく。実学とは、現行の国家・社会の役に立つという至上目的を追求する学問である。実学の成果は、理想的には人類全体の福利向上のために使われるべきであるが、企業にとっては利潤追求が重要な目的となるであろう（個人の金儲けのためというのは論外とする）。税金を使って行う実学研究、とくに大学における実学研究は前者を目指すべきであるが、現状は少し異なっている。今日問題となっている研究不正は、研究成果が、知的財産権保護の名のもとに、必要以上の過大な利益をもたらす仕組みに起因するように思われる。実学の成果が貴いものであればあるほど、それがもたらす過剰な利益が富の分配における不均衡を世界規模でもたらすことになる（池田, 2016）。こういう議論をすると決まって、利益を生まなければ研究開発が進まないという反論があるが、本当にそうであろうか。私を含む大方の中高年がNHKの「プロジェクトX」を視て涙するのは、そこに損得を超えた実学的動機を感ずるからである。また、1980年代にリチャード・ストールマンが提唱し、今日に至るまでコンピューターソフトウェアの発展と普及に大きな貢献をしてきたフリーソフトウェア運動も、知的財産権の過剰な行使に対するソフトウェア開発者達の反発から生まれた（Stallman, 1983）。ただし、多くの革新的技術が戦争から生まれたという実学の暗い側面も忘れてはならない。

話を本題に戻して結論を述べよう。地理学が目指す最も重要なゴールの1つは、人類が自らを取り巻く自然環境をいかにして受容し、適応し、克服してきたかを、地質学的な過去にまで遡ってグローバルに探求することであると私は考える。人類の環境に対するインパクトは、約7.5万年前から始まる最終氷期以降徐々に高まってきたが、特に顕著になったのは過去一世紀足らずの

間である。その結果起こったことは、人口爆発、エネルギー・土壌資源の枯渇、地球温暖化、地球規模の環境汚染、貧困等である。これら互いに関連する問題を総合的に解き明かして解決策を模索することは、学問的に極めて面白い課題であるとともに、近い将来の人類の運命を左右する今日的課題の解決のために無くてはならない基礎研究である。

2. 地球史のなかの現在

1) 地球科学は博物学

地球科学は博物学である。こう言うと、気象予報のように大型計算機を駆使して数値シミュレーションを行えば何でも説明できるのではないかという反論がありそうである。専門家の中にさえ、そういう誤解をしているらしき人がいる。地理学を含めて地球科学は、地球上に分布する地域的な多様性に富んだ現象とその進化とを研究する学問である。それらの現象は極度にカオティックであり、したがって基本的に再現不可能である。どんなに大きな計算機を導入しても天気予報がはずれるのがその分かり易い例である；人文現象については例を挙げるまでも無いであろう。

再現不可能な事象を研究する常套的な手法は博物学である。博物学ではまず、現象の蒐集と記載をおこなう。つぎに典型例（タイプ）を選択し、それに基づいて分類と体系化とをおこなう。再現不可能な現象の蒐集のためには、時空を広く探索する必要がある。世界中に類似例を探索するのは当たり前として、地質学的な遠い過去まで遡って探索することも重要である。この意味で、地球科学は歴史学に似ていると言えるかもしれない。何をタイプに選ぶかは、研究者個人の置かれた環境と経験とに依存する。これは宇宙論における「人間原理」(anthropic principle)にも比すべき、博物学が避けて通ることの出来ない本質的な制約である。地理学を含めて博物学をこころざす者が広く世界を見なければいけない理由が此処にある。また、地球科学の大学教育において伝統的に経験主義的基礎教育が重視されてきた理由も此処にある。

ところが近年、世界的にこの経験主義的基盤がゆらいできた。以下は、最近出版された世界の地域地質とテクトニクスに関するモノグラフの序文中に見つけた一文であり、面白いので引用しておく：

*“... Over the recent past, the broad experience base in both industry and academia has been phased out through retirement, redundancy and focus on specific research areas. In the case of industry, a new generation of younger specialists, sometimes called Nintendo geoscientists, are trained to solve specific practical problems based on highly focussed data acquisition and interpretation using workstations. In academia, an increasingly holistic focus on earth systems science is eroding the broader geological base that has hitherto underpinned scholarly research.” (アンダーラインは池田による；出典：Roberts, D.G. & A.W. Bally (eds.), 2012, *Regional Geology and Tectonics*, Vols. 1A–1C, Elsevier, p. xxxviii.)*

総頁数 2500 を越えるこの大部のモノグラフは、大学や石油探査会社に所属し長年にわたって探査地球物理学、構造地質学、石油地質学等の研究に携わってきた多数の研究者が共同執筆したものであり、老後の楽しみのために買っておいた。その序文には経験主義的地球科学教育の基盤が失われていく事への危機感と寂寥感とが感じられる。またこの序文の中で、昨今の若手研究者を任天堂地球科学者と呼んだり、プレートテクトニクス以後の地球科学界を席卷した地球システム

学の流行に対する少し悪意のこもった批判があつたりするのも興味深い。世界中で同じ事が起こったのだな、というのが率直な読後感である。

結論として、今日の地球環境問題の本質を理解し、将来に向けてその解決策を模索する上で、歴史に学ぶことが重要である。今日の問題を考えるに先立って先ず、地球の誕生まで遡って歴史的（地球史的）展望を得ることを試みよう。

2) 生命と地球の共進化

地球のように液体の水が表層部に豊富に存在する惑星は類例がない。この水（海洋）が生命を生み出す源である。約 46 億年前に地球が誕生してから十億年ぐらい経過して最初の生命が海洋で生まれた。遺伝子解析によって地球上のあらゆる生物を分類し、進化の系統を追っていく研究が進んだ結果、現存する最も下等な生命は「真正細菌」という一群の微生物であることが分かった（Woese and Fox, 1977; Woese *et al.*, 1990）。最初に地球上に登場した生命は、現存する最も下等な生物かそれに類するものであろうと考え、その最有力候補と目されたのはシアノバクテリア（藍藻類）と呼ばれる真正細菌である。

シアノバクテリアは光合成をおこなう。太陽系の他の岩石惑星（金星、火星、など）を取り巻く大気はほとんど全て（95~96%）炭酸ガスである。ところが、地球の大気には炭酸ガスが極わずか（0.04%）しか含まれず、それに代わって異常に多い量（21%）の酸素が含まれている。地質学者は既に、約 25~22 億年前に世界の浅海底に酸化鉄（ Fe_2O_3 や Fe_3O_4 ）を含む地層（＝縞状鉄鉱層）が大量に堆積し始めた事を知っていた。また、この頃から大量の石灰岩（ CaCO_3 や MgCO_3 ）が堆積しはじめたことも分かっていた。光合成細菌は酸素を生成するほかに、光合成の副作用として「石灰化」を引き起こすので、こうした地層が存在することは生命が誕生したことを示す間接的ではあるが確かな証拠であると考えられている。しかし、シアノバクテリアの化石を地層の中から直接検出することは極めて難しく（Schopf, 1993, など）、現在に至るまで確かな化石の証拠は得られていない。化石の証拠が残っているかどうかはともかく、状況証拠から見て、地球の歴史の初期に生命が誕生し、それが大気を含めた地球表層の環境を劇的に変えたことは明らかであり以下がその大まかなストーリーである（例えば、Kasting, 1993; 阿部・田近, 2007; 松本ほか, 2013）：

- a. 地球誕生直後（約 46 億年前）の大気は、火星や金星と同様にほとんど炭酸ガスであったが、光合成細菌であるシアノバクテリア（藍藻）が生まれたことにより、大気中の二酸化炭素濃度の減少と酸素濃度の増加が始まった；
- b. 25~22 億年前にはシアノバクテリアの大繁殖が起こったらしい；その結果、鉄イオンが酸化されて大量の縞状鉄鋼層が形成された；また、光合成の副作用として炭酸塩鉱物の沈殿も起こり、先カンブリア時代の終わり頃（5.4 億年前）まで炭酸ガス濃度は更に減少しつづけた；
- c. 顕生代（5.4 億年前以降）になると陸上植物が登場し、古生代の後期には大量の植物遺体が地層中に埋没して炭素を固定することによって、炭酸ガス濃度は更に減少した。海洋でも生物遺体が地層中に埋没し、炭酸ガス濃度の減少に寄与した。

重要なことは、生命の進化が地球の環境までも変えたという事実である。地球環境の変化はまた、新たな生命の進化を引き起こす；光合成生物が生み出した酸素と有機物とをエネルギー源とする生物（動物や菌類等の従属栄養生物）の登場がこの例である。これを生命と地球の「共進化」と呼ぶ。現在の地球環境問題は、先カンブリア時代におけるシアノバクテリアに代わって人

間が主役となって引き起こしたものである（後述）。その意味で、生命と地球の共進化の一コマを見ていると言えなくもない。しかし、その進化の先にどんな未来が待っているかを想像すると、決して安穩としてはいられない。

もう一つ重要なことは、産業革命以降に起こった人類の大繁殖を支えてきた化石エネルギー資源と鉱物資源の起源が、生命と地球環境の共進化の過程と密接に関わっているという事実である。例えば、人類が現代文明を築くうえで莫大な量の鉄とコンクリートを必要としたが、鉄の原料の大部分は、上述のシアノバクテリアが大繁殖した結果堆積した縞状鉄鉱層である。又、セメントの原料である石灰岩は、シアノバクテリアやサンゴの共生細菌による光合成の副産物である。大気中の炭酸ガス濃度の減少は、(1) 光合成の副作用によって起こる炭酸塩鉱物の沈殿のほかに、(2) 生物起源の有機物が地層中に埋没し固定されることによって起こる。化石エネルギー資源は後者の過程で生まれた。石炭が大量に生成したのは古生代の後期であり、この時期陸上植物の大繁殖が起こった。古生代の終わり（2.5 億年前）には海洋動物の大量絶滅イベントが起こるが（後述）、引き続き中生代には大量の有機物（主として藻類）を含む地層が浅海底に堆積し、石油の根源岩となった。地層中への有機物の固定は新生代（6550 万年前以降）になっても続き、その結果、地球誕生時点において 95–96% もあった大気中の炭酸ガス濃度は、極めて低いレベル（0.028%）まで減少した。現在は人為によってこの逆の過程が進行しつつある。

3) 過去の大量絶滅イベント

顕生代（5.4 億年前以降）になると突如として様々な高等生物が登場し、その後現在に至るまで地球全体の生物相は多様化した。シカゴ大学のセプコスキーは、過去の膨大な文献を参照して海洋生物の多様性の時代変遷を示し、顕生代において 5 回の大量絶滅イベントがあったことを明らかにした（Raup and Sepkoski, 1982; Sepkoski, 1984）。その中で最もよく知られているのは古生代末（ペルム紀–三畳紀境界；2.5 億年前）に起こった地球史上最大の絶滅イベントであり、海洋動物の 90% 以上の種が短期間に消滅したと推定されている。この時期に深海底が無酸素状態になったことも分かっている。しかし、大多数の海洋動物が棲むのは浅海であり、そこが無酸素化した可能性はあまりないので、多分深海底の無酸素化はこの絶滅イベントの直接の原因ではない（たとえば、松本ほか、2013）

もう一つの例は、白亜紀–第三紀境界（K–T 境界；6550 万年前）に起こった大量絶滅で、陸上では大型爬虫類（恐竜）が絶滅したことでよく知られている。恐竜だけでなく、約 76% の海洋動物種が絶滅したと推定されている（Raup and Sepkoski, 1982）。その原因が巨大隕石の衝突であることをつきとめたのは、カリフォルニア大学バークレイ校の核物理学者で原爆開発にも関わった Luis W. Alvarez と息子の地質学者 Walter Alvarez の親子コンビであった（Alvarez *et al.*, 1984, など）。世界各地において、生物相が激変する白亜紀–第三紀境界の層準には、厚さ数 cm～数 10 cm の黒色の粘土層（「境界粘土」）が存在することが分かっていた。この境界粘土は巨大隕石が衝突した際に大気中にばらまかれて拡散した塵ではないかと考えた Alvarez 親子は、彼等の仮説を証明するために、境界粘土層に含まれるイリジウムの濃度を測定した；イリジウムは隕石中に多く含まれる（> 0.5 ppm）元素であるが、地殻中にはほとんど無い（0.001 ppm）ので、境界粘土が隕石衝突に起因することの証拠となるからである。世界各地のサンプルを測定した結果、境界粘土層は異常に高濃度のイリジウムを含むことが分かった。衝突した小天体の直径は 10 ± 4 km ぐらい、衝突場所はユカタン半島北部、衝突で出来たクレーターの直径は約 180 km と推定されている

(Hildebrand *et al.*, 1991).

4) 現在進行中の大量絶滅

セブコスキーが見落としたもう一つの大量絶滅イベントが現在進行中である。これは過去数万年間に加速度的に進行しつつあるので、「人類紀大量絶滅イベント」と呼んでおく。このイベントを特徴付けるのは、大型草食動物の大量絶滅であり、その規模は白亜紀末（6,500 万年前）の恐竜絶滅イベントに匹敵するかそれを上回ると考える古生物学者もいる。もう一つの特徴は人類の大繁殖（人口爆発）が起こったことであるが、これについては次節以降で議論する。

最終氷期の初期（約 7.5 万年前）から 1 万年前までの間に、世界の大型動物のうち 90~150 属（genera）が絶滅したと推定されている（Koch and Barnosky, 2006）。オーストラリア大陸では、大型草食動物の 16 属中 14 属（88%）が 8 万年前から 4.6 万年前の間に絶滅した。ユーラシア大陸では、大型草食動物 26 属中 9 属（35%）が 4.8 万年前から 1.1 万年前の間に絶滅した。南北アメリカ大陸における絶滅イベントはもっと劇的である；1.3~1.1 万年前のわずか 2000 年間ほどの短期間に、北米では 47 種中 34 種（72%）の、南米では 60 種中 50 種（83%）の大型動物が姿を消した（Koch and Barnosky, 2006; Braje and Erlandson, 2013）。日本でも約 2 万年前にマンモスが絶滅した（Iwase *et al.*, 2012）。

この大量絶滅の原因は人類による捕食である（Martin, 1966; Gillespie, 2008; Sandom *et al.*, 2014）。最終氷期の寒冷化によって、ユーラシア大陸では草原やツンドラが広がり、大型草食獣にとって有利な生息環境が広がった（たとえば、Foucault and Noblet-Ducoudre, 2005）。ツンドラは不毛の環境ではない；夏になれば豊かな草原に変身するので、草食動物にとっては有利な生息環境である。生まれ故郷のアフリカを出て、13~10 万年前頃に北東アフリカ~アラビア半島まで進出した我々の祖先（新人=ホモ・サピエンス）は、最終氷期が始まった 7.5 万年前頃アラビア半島を飛び出して（Behar *et al.*, 2008; Klein, 2008; Rose *et al.*, 2011, など）、草原やツンドラに群れなす大型草食動物を食べ尽くしながらあっという間に世界中に拡散して行った。最終氷期における大型草食動物の絶滅は、アフリカ大陸とユーラシア大陸（そのうちの特に南部）では新大陸における絶滅ほど劇的では無い。その理由は、これらの地域がもっと以前（第四紀の初期）から原人や旧人の捕食による絶滅を経験してきたからであると考えられている（たとえば、Martin, 1966; Sandom *et al.*, 2014）。ただし、最終氷期におけるこの大量絶滅の原因が気候変化にあるという異説が根強くある事も事実である；特に、南北アメリカにおける絶滅時期が後氷期の急激な気候変化（Younger Dryas; 12,900 年前から 11,600 年前までの間に起こった一時的な寒冷期）と対応することから、気候変動原因説を支持する研究者（特に米国の考古学者）は多い（たとえば、Grayson, 2007）。しかし、同様に劇的な大量絶滅が起こったオーストラリア、ニュージーランド、マダガスカルにおける絶滅時期は、特定の気候変動イベントとは対応せず、それぞれの地域に新人が拡散していった時期と一致するので（Martin, 1966; Gillespie, 2008）、人類による捕食が大型草食動物大量絶滅の原因であるという結論は動かしがたいと思われる。

新人が拡散していった過程で、最後に残った草食獣の楽園は南北アメリカ大陸であった。ベーリング海峡（当時は海面が低かったので陸続きだった）を渡ったモンゴロイドの一団は、北アメリカ大陸の極北部を覆っていた大陸氷床によってしばらくの間行く手を阻まれていた。しかし、13,000 年前頃に氷床の一部が融けて「無氷回廊」が出現すると一気に北米になだれ込み（Martin,

1973; Bonatto and Salzano, 1997), 草食獣を食べ尽くしながら 2000 年足らずの間にパタゴニアまで達した。これは当時の人類にとって血湧き肉躍るような冒険行だったに違いない。定住せず、群居性の家畜を飼わない狩猟民の集団は、新型コロナウイルスが引き起こしたような伝染病とも無縁であったと考えられる。また、多くの文化人類学者が報告しているように、一般に狩猟社会では食料が公平に分配され格差が無い；現在我々が直面する様々な社会問題が、急速に拡大しつつある所得格差に起因する（たとえば、Wilkinson and Pickett, 2010）ということと対照的である。この頃の人類は幸せであったと私は想像する。

人類の苦悩は約一万年前に大型草食獣を食べ尽くしたところから始まる。この頃までに地球は急激に温暖化し、草原とツンドラが縮小し、それにかわって森林が拡大する（たとえば、Foucault and Noblet-Ducoudre, 2005）。世界の各地で農業が始まったのはこの頃である。

3. 農業と地球環境

人類がアフリカを飛び出してから現在に至るまで、世界の人口は獲得できる食料の量に律速されていた。これは一部の先進国を除けば現在でも当てはまる。後述のように、マルサスの唱えた人口論は今でも活きている。人類の生存にとって最も重要なのは食料である。

農業（牧畜も含む）による食料生産は、そのおおもとを辿ると生物一次生産に帰着する。生物一次生産とは、植物や細菌が光合成によって有機物を生産することである；我々は直接・間接にこの有機物を食料としている。生物一次生産には先ず、(1) 十分な日照と (2) 高い気温が必要であり、そのほかに有機物の原料として (3) 水、(4) 炭素（炭酸ガス）、(5) 窒素（窒素ガス）、および (6) その他様々な種類の栄養元素を必要とする。(3) 水、(4) 炭素、および (5) 窒素は大気から供給され、(6) その他様々な種類の栄養元素は岩石から供給される。(1) (2) (3) の条件にかなうのは熱帯・亜熱帯の湿潤地域である。植物や光合成細菌は大気中の炭素（炭酸ガス）を直接吸収できるので、こうした良好な気候下において生物一次生産を律速するのは、(5) 窒素と (6) その他の栄養元素である

(5) と (6) については説明が必要である。大気中の窒素ガスをアンモニアや硝酸に変える化学反応を「窒素固定」と呼ぶ。土壌やマメ科植物の根の中には、窒素固定をする細菌が棲んでいる；上述のシアノバクテリアも窒素固定をすることが知られている。陸上植物は大気中の窒素を直接吸収することができないので、窒素固定細菌が生産する硝酸を取り込む。そのため、原料の窒素ガスは大気中に無尽蔵にあっても、固定窒素の供給速度には限界がある。同様な制約は、岩石から供給される 30 種類を超える様々な栄養元素（P, K, Ca, S, Mg, Na, Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo, Ni, など）についてもある。これらの栄養元素は、新鮮な岩石が風化される過程でイオンとなって溶け出し、いったん土壌中の粘土鉱物（そのうちでもスメクタイト族と呼ばれる一群の粘土鉱物）に吸着される。植物は粘土に吸着された陽イオンを栄養として取り込む。したがって栄養元素の供給速度は、土壌中に含まれる新鮮な岩石片の量と風化速度とに制約される。土壌を介して岩石圏と陸上生態系との間で起こる栄養元素の循環過程は、長時間スケールでみた農業生産性の変動や真に持続可能な農業のありかたを考える上で極めて重要であるが、初めてそれを明確に指摘したのは多分、農学者では無く、岩石学者の William S. Fyfe であった。ニュージーランドの農園に生まれ 1952 年に Otago 大学で学位を取って Western Ontario 大学に職を得た Fyfe は、1980 年代に自分の本来の専門とは少し離れた岩石圏と生命圏との相互作用について重要な貢献をした（Fyfe,

1981, 1989; Fyfe *et al.*, 1983, など). Fyfe の研究の中で私が特に蒙を啓かれたと感じたのは、熱帯湿潤気候下にある安定大陸の土壌に関する研究である。こうした環境下における土壌は、深さ 100 m を越える深層風化帯の上に発達し、Al, Fe, Ti の以外の栄養元素が溶脱によってほとんど枯渇しているにもかかわらず、この土壌によって支えられている熱帯林の一次生産速度は極めて大きい。これは膨大な量のバイオマスに蓄積された栄養塩が効率的にリサイクルされることによってのみ成り立つ一種の自転車操業である (Fyfe *et al.*, 1983) ; 熱帯雨林を伐採して木材を搬出すると、森林を再生するに足る栄養元素の蓄えがもはや土壌中には無いことを彼等の研究が示した。高温で湿潤な安定大陸は、持続的な農業を行うには最も不適な環境である。

土壌の役割は重要である。自然状態の陸上生態系では、植物やそれに依存する動物の遺骸に含まれる固定窒素と栄養元素とが土壌に貯留され、それを再び植物が吸収するというリサイクルが働く ; このリサイクルにおいて土壌中に棲む大量の微生物 (主として細菌) が重要な役割を果たしている。土壌の構成要素のうち、「腐植」という呼称で一括される有機質の物質がこの微生物のすみかであり、固定窒素の生産とリサイクルとに重要な役割を果たしている。土壌のもう一つの構成要素は上述の粘土鉱物であり、これは岩石起源の様々な栄養元素の貯留に重要な役割を果たしている。土壌を構成する第三の要素は未風化の岩石片 (礫, 砂, シルト, 火山灰など) である。植物は未風化の岩石に含まれる栄養元素を直接吸収することができないので、陸上生態系への栄養元素の供給は必ず風化というプロセスを通じておこなわれる。風化速度を律速するのは、水、温度、および土壌中に含まれる岩石片の総表面積 (総体積では無い) である。熱帯~亜熱帯の湿潤気候下で土壌中に細粒の (従って反応表面積が大きい) 岩石片が十分存在すれば、土壌への栄養元素の新たな供給が効率的に行われ、溶脱によって失われた分を補うことができる。先に例を挙げた熱帯湿潤気候下にある安定大陸の場合、土壌中のみならず地下 100 m 以上の深部に至るまで深層風化が及んでいるため、新たな栄養元素の供給はほとんど見込めない。こうした環境下にある陸上生態系がほとんどリサイクルだけで維持された自転車操業状態となるのはこのためである。

しかし、農業によってこのリサイクルの輪を断ち切ると、土壌に貯留された固定窒素と栄養元素が急速に消耗し、収穫量は指数関数的に減少してゆく。畑作に依存する古代文明の多くが土壌の枯渇によって衰亡したが (たとえば, Vita-Finzi, 1969; Montgomery, 2012), 文明が長期間持続した場所は、ほぼ例外なく土壌が更新される場所である。地表面 (土壌) を更新するプロセスとして挙げられるのはまず、洪水、泥流・土石流などである。これらは上流の山地斜面で生産された新鮮な土壌を下流の沖積平野へ運搬する。ガンジス・ブラマプトラ川中下流域では、数年に一度の高頻度で平野域の数十%が冠水する洪水が発生し、起伏の大きい高ヒマラヤから運搬された新鮮な土壌が大量に堆積する。大河川の沖積作用がインダス、メソポタミア、エジプト、黄河流域等における古代文明を持続的に支えたことはよく知られているが、もう一つの重要な地表面更新プロセスは、火山活動である。地下深所から供給されるマグマは、栄養塩類を豊富に含む。マグマが破砕されて細粒化した火山灰は、広範囲に堆積して土壌の理想的な母材となる。ジャワ島は世界で最も人口密度が高い地域の一つであるが、千年以上にわたってこの島の人口を支えたのは島弧火山活動がもたらす栄養塩であったと考えられる。同様に、溶脱作用を受けにくい乾燥地域から供給される風成塵も理想的な土壌母材である。黄河中流域には第四紀を通じて堆積した厚さ数百メートルに達する黄土層が存在する。黄土は風成塵を母材とする古土壌 (化石土壌) である。黄土高原における農業は、現生の風成塵に加えて、層厚数 100 m にもおよぶこの古土壌を消費す

ることで生産性を維持してきた可能性がある。さらに津波さえも土壌更新プロセスの一つといえるだろう。結局、ここに列挙した土壌更新プロセスは、すべて自然災害の要因であることがわかる（池田, 2016）。

畑作に比べると、水田耕作はかなり持続可能性が高いようである。その理由はたぶん今後の重要な研究課題であり、農学系の土壌学者による研究を探しても十分な答えが見つからない。とはいえ、可能な理由は以下のようなものであると推定される。水田土壌はスメクタイト族の粘土鉱物を多量に含む。灌漑水には、流域の岩石が風化することによって溶け出した栄養元素が含まれるが、水田土壌中の粘土鉱物はこの栄養元素を吸着する。床土はまた、不透水層となって灌漑水を無駄なくトラップするから、河川水中に溶存する栄養元素の吸着を効率良く行う事にも寄与すると考えられる。さらに水田では、湛水によって繁殖するシアノバクテリア等の藻類が固定窒素の供給に寄与すると考えられている（高井, 1980, 1981）。

本節の最後に、自然災害と農業の関係について少し補足しておこう。上述のように、土壌中の栄養元素を長期にわたって維持する為には土壌の更新が必要であるが、土壌更新のプロセスは洪水、土石流、火山噴火、風成塵（降砂）等であり、これらは自然災害の要因となる。多くの人命を一瞬にして奪う津波も土壌更新プロセスの一つと見なすことが可能である。したがって、土地生産性（land productivity）という観点からみれば、人類の生存にとって最も有利な地域は熱帯～亜熱帯の変動帯、その内でも特に火山弧であるといえよう。また本節の始めに、生物一次生産を促進する条件として、高温・多湿の気候を挙げたが、これは農業にとって好ましい条件であるだけで無く、病原菌や害虫にとっても好ましい条件であり、それはバイオ・ハザードに富んでいることを意味する。人類は過去一万年間の歴史のなかで、土地生産性と災害のリスクとを秤にかけて二通りの選択をしたらしい。我々日本人を含むモンスーンアジアの住人は、自然災害の危険が高い瘴癘の地に密集して暮らすことを敢えて選択したと言えるであろう（池田, 2016）。一方、極北のイヌイットや砂漠のベドウィンのように、自然災害や伝染病の危険を避け、希薄な人口密度を保ち、穏やかに暮らすことを選択した人類集団も存在する。

4. 緑の革命と人口爆発

人類が農業を始めてからつい最近（数百年前）に至るまで、農業生産の速度を律速してきたのは、自然のプロセスで起こる窒素固定と岩石風化の速度であった。また、土壌に蓄積された栄養（特に固定窒素）を維持するために、ありとあらゆる物（主として有機物）が農地にリサイクルされていた。産業革命が始まった頃からヨーロッパや北米では、有機肥料に加えて、硝石やグアノといった固定窒素を多量に含む肥料を農地に投入することによる食糧増産が始まった（たとえば、田口・西村, 2000; Mehring *et al.*, 1957）。1820年頃から20世紀初期までは、チリ硝石が最大の硝酸塩資源であり、その供給量は最大2 M tons/yr（窒素量に換算して約0.5 M tons/yr）程度であった。とはいえ、20世紀の初め頃までは、先進国においてさえ有機肥料の占める割合が卓越していた。米国に例を引くと、20世紀初頭の10年間においてさえ、チリ硝石や化学合成した窒素肥料の割合は全窒素肥料の11%にすぎず、残りの約90%は食肉用動物の残渣（骨、乾燥血液、内蔵など）やグアノなどであった；工業的に合成された窒素肥料の割合が増え始めるのは第一次大戦後からである（図1; Mehring *et al.*, 1957）。しかし、グアノは短期間で底をついた。加えて戦争が始まると硝石や化学合成された固定窒素は火薬の原料となるので農地にはまわってこない。

この状況を打破したのはドイツ人の化学者、Fritz Haber と Carl Bosch である。二人は、1908 年に窒素ガスからアンモニアを製造する方法 (Haber-Bosch 法) を発明し、第一次大戦中 (1914~1918) には工業化に成功した (Smil, 2001, など)。第一次大戦が始まるとドイツはチリ硝石の輸入が出来なくなったが、その不足分を Haber-Bosch 法による固定窒素生産で補った。その結果、第一次大戦中にドイツの硝酸生産量は窒素量に換算して最大 0.3 M ton/yr 程度までになり、火薬製造に必要な硝酸の大半を供給できた (高橋, 2005)。この生産量は TNT (trinitrotoluene) 火薬を 1.6 M ton/yr 生産できる量であり、広島型原爆 (約 0.015 M ton TNT 相当) 100 個分のエネルギー量に相当する火薬を毎年製造できたことになる。Fritz Haber は、1914 年から毒ガスも開発した；この毒ガス (塩素ガス) は 1915 年 4 月にフランス軍との塹壕戦に用いられ、効果を発揮した (死者 15,000 人)；塩素ガスは空気よりも比重が大きいため塹壕の中に滞留し、中にいる兵士を効果的に殺すことが出来るからである。彼は 1920 年にノーベル化学賞を受賞するが、その後ユダヤ人であったためにドイツを追われ、1934 年にパレスティナへ移住する途中スイスにて客死した。彼の妻 Clara Immerwahr は化学者であり敬虔なユダヤ教徒であったが、夫が毒ガス開発に携わったことを苦にして、第一次大戦中の 1915 年 5 月にピストル自殺した。Carl Bosch は、窒素固定技術の工業化に貢献し、1932 年にノーベル化学賞を受賞する；第一次大戦直後に BASF のトップとなり、その後もドイツ化学工業界に君臨した (Smil, 2001)。

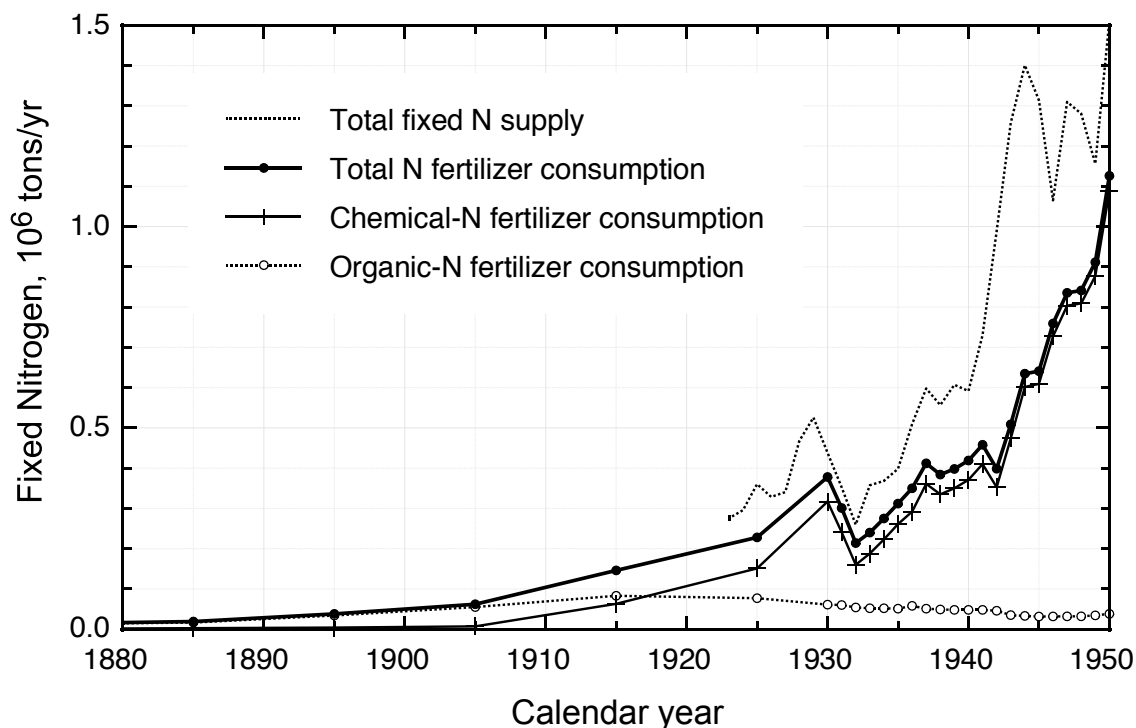


図 1. 米国における窒素肥料消費量の変遷。Mehring *et al.* (1957) のデータによる。有機窒素肥料の категорияはグアノを含む。化学窒素肥料の категорияはチリ硝石等の鉱物肥料を含む。第二次大戦中に固定窒素の全供給量は肥料としての消費量の倍以上まで増大し、戦後も数年間高レベルを維持していることに注意。

しかし敗戦国となったドイツは、この工業的窒素固定技術の特許を世界に公開させられることとなった。先進諸国において工業的固定窒素生産が本格的に始まるのは、この頃からである（例えば、図1）。第一次大戦と第二次大戦において、戦争による死者数はそれまでより一桁以上多い数千万人（非戦闘員を含む）のオーダーに達した；窒素固定技術の発明が、壊滅戦争の始まりになったと言えるであろう。米国における固定窒素生産量は、第二次大戦中の数年間、肥料としての消費量の倍近くまで拡大した。戦時中はほとんどの国が食糧不足に陥ったにもかかわらず、米国ではこの間も窒素肥料消費量が伸び続けていた（図1）。注目すべきことは、第二次大戦後の数年間もこの勢いが継続し、米国国内での窒素肥料消費量を大幅に上回る固定窒素生産が持続したことである（図1）。その結果、1940年代の終わり頃に米国は大量の固定窒素の余剰を抱えていたはずである。そのはけ口の1つは朝鮮戦争（1950–1953年）であったかもしれないが、これについては未検証である。もう一つのはけ口は、他国（主として発展途上国）への窒素肥料輸出であり、これが次に述べる「緑の革命」を引き起こすきっかけとなったと考えられる。

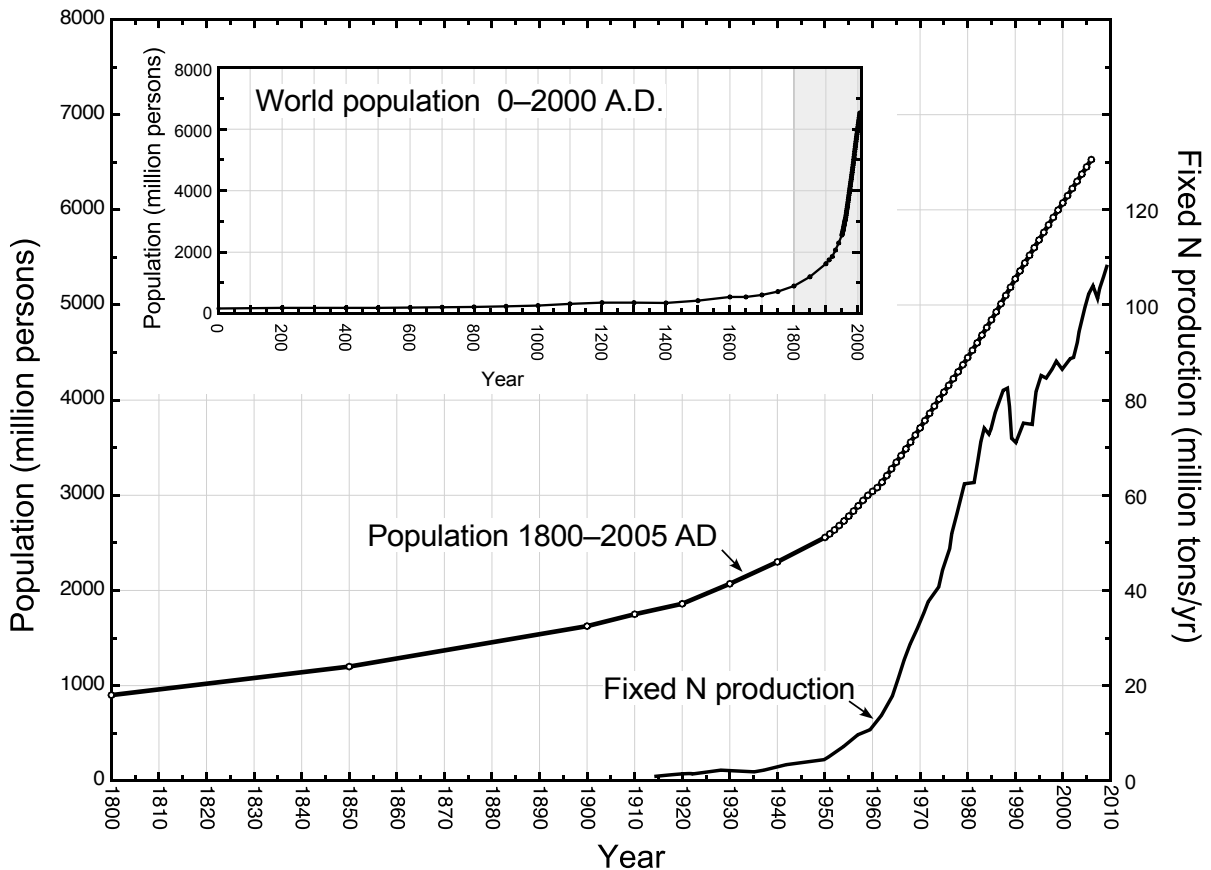


図2. 世界の総人口と工業的窒素固定量の推移。挿入図は過去2000年間の人口推移。1950年以後の人口データはU.S. Census Bureau (2006)による；1950年以前の人口データはUnited Nations (1999)による。工業的窒素固定量（窒素量換算値）は大河内 (2016)による。第二次大戦後現在までの間に世界の固定窒素生産量はほぼ二桁増加したが、そのほとんどが肥料として用いられている。

第二次世界大戦後、従来型火薬に代わって核爆弾が普及し東西冷戦が始まると、余った硝酸塩が農業用に転用されるようになった。その結果いわゆる「緑の革命」が始まり、農業生産性が数倍に高まった（図 2）。緑の革命とは通常、品種改良によって高収量品種を開発したことと理解（宣伝）されている（たとえば、斎藤・編, 1972, p. 14）。しかし、そう宣伝したのは、かつて強大な軍需産業であった化学産業とそこから研究資金を供給された農学者である。その背景には、窒素肥料の大量投入による高収量生産を実現するために、多量の肥料摂取に耐える新品種を開発せざるを得なかったという事情がある。緑の革命の本質はむしろ窒素肥料の過剰投入にある。窒素肥料の過剰投入はまた、農薬の需要を高めるという化学産業にとって好ましい効果もあった（後述）。

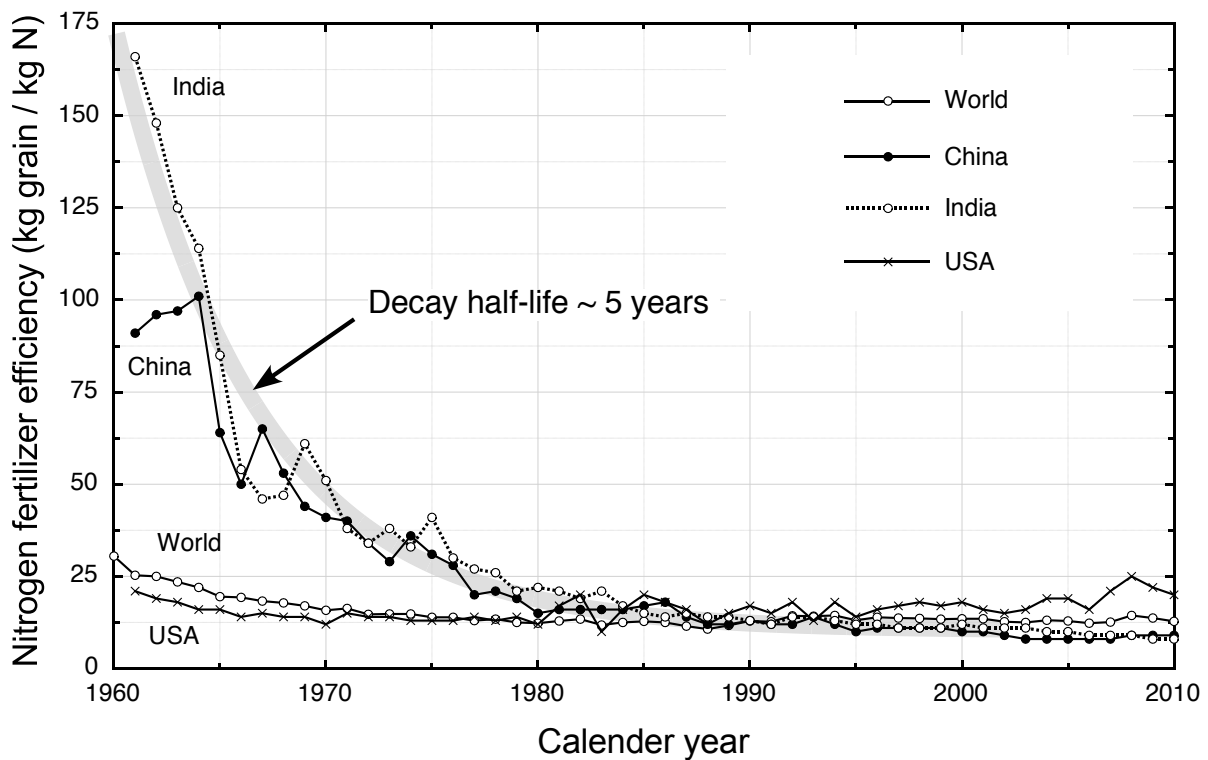


図 3. 穀物生産における窒素肥料効率の推移 (Brown, 2014, がコンパイルしたデータにより作図)。窒素肥料効率とは、単位面積あたりの穀物収穫量とそこに投入した窒素肥料の量（窒素量換算）との比率。全世界平均と主要三カ国（米国，中国，インド）の例を示す。灰色の太線は半減期 5 年の指数関数曲線。

「緑の革命」は深刻な副作用を伴った。工業的窒素固定によって生産した硝酸塩を大量に投入して収量を上げる農法は、同時に土壤中に蓄積された岩石起源の栄養元素の消費を加速させる。岩石の風化による栄養元素の供給を消費が上回れば、土壌は急速に消耗する。土壌中に栄養元素の蓄えがなくなると、固定窒素をいくら投入しても収量はそれに見合うだけ増えなくなる。1960年代初期から緑の革命が始まったインドや中国では、穀物の窒素肥料効率（窒素肥料 1 トンあたりの穀物収穫量）が半減期約 5 年で急速に減少している（たとえば、Hatfield and Prueger, 2004; Brown, 2014）。この減少パターンは指数関数で見事に近似できることから（図 3）、単純な物理法

則に則っていると予想される。即ち、窒素肥料の過剰投入が土壌中に蓄積された栄養元素の減少を引き起こし、それが作物の生長を律速するというシナリオである。緑の革命が始まって 20 年を経過した 1980 年代には、既に世界中で土壌の消耗が進んでいた。北米ではインド・中国より 20～30 年早くから、ヨーロッパでは更にもっと早く多分産業革命の頃から、土壌の消耗が進んでいたと考えられる。北米では、見かけ上ヨーロッパより土壌の疲弊が遅れて進行しているが (Hatfield and Prueger, 2004), それは広大な未耕作地を求めて西へ北へと農地を開拓してきた (食い潰してきた) ことに起因する。1862 年に成立した自営農地法 (Homestead Act) を契機に始まったこの拡大は 20 世紀に入っても止まらなかった。一方、ヨーロッパでは、たぶん中世には既に開拓すべき土地が無くなっていったため、産業革命によって増大した食料需要をまかなう必要から、既存の農地に肥料を大量投入する農法が始まっていたらしい。

緑の革命の第二章とも言うべき変革は、除草剤の普及と遺伝子組み換え作物の開発である。これを主導したのは、またしても Monsanto 社に代表される強大な軍需産業であった (Monsanto 社が行った数々の悪事については、フランス人ジャーナリスト、マリー＝モニク・ロバン (2008 ; 邦訳 2015) が詳細な証拠に基づいて実証的に暴露し、ヨーロッパでベストセラーになった ; 彼女の著作とそれに基づく映画は、EU 諸国内での世論形成と食糧政策に大きな影響を与えたといわれている)。第二次大戦後の緑の革命がもたらしたもう一つの変化は農業経営の大規模化であった。肥料・農薬・種子・農業機械を購入するための資本を持たない中小規模の農家は淘汰され、農業は規模が大きい少数の経営体に独占されるようになった (梅原, 1978, 1993; 菊池, 1986, など)。機械化に伴って農薬、とくに除草剤、の使用量が増加した。Monsanto 社はベトナム戦争で使われた枯れ葉剤 “Agent Orange” の主要メーカーであるが、1974 年に除草剤のベストセラー “Roundup” を発売した。Monsanto 社はさらに、自社の除草剤を効果的に使用するために除草剤耐性を有する遺伝子組み換え品種の開発を進め、1990 年代後半に実用化した。また、一般に多収量品種は在来品種に比較して病害虫に弱いので、病害虫耐性遺伝子を組み込んだ新品種も開発された。それ以後、北米、南米、インド、中国などの国々では、遺伝子組み換え品種が急速に普及した。現在では既に、アメリカ産の大豆、トウモロコシ、および綿花の 90% 以上 (作付け面積割合) は遺伝子組み換え品種で占められている。このうちトウモロコシは、食肉生産用として日本、韓国、台湾、中東諸国などを中心に広く輸出されている。因みに EU 諸国 (そのうち特にドイツ) では、遺伝子組み換え農産物の生産・輸入について極めて厳しい規制がある。

緑の革命によって人類は短期的に食糧増産を達成した。しかしそれは、土壌資源の急速な消費と化石エネルギーの大量消費とに依存するので、持続可能ではない。窒素固定には大量の化石エネルギーが必要であり、固定窒素 1 kg (窒素換算) を生産する過程で約 4.4 kg の炭酸ガスが発生する (Schledinger, 2000)。地球上に投入されている全固定窒素量 150 M ton/yr (窒素量換算) のうち、植物に吸収されたり土壌に貯留される量はわずか 9 M ton/yr (~6%) に過ぎず、陸水や大気によって海洋へと運搬される量が 98 M ton/yr, 脱窒によって大気に戻る量が 17 M ton/yr, 行方不明が 26 M ton/yr と見積もられている (Schlesinger, 2008)。要するに、窒素肥料の 90% 以上が大気や海洋に流出して汚染を引き起こしていることになる。この流出量は、自然状態で生物がおこなう全窒素固定量にほぼ匹敵する ; 人間活動の環境へ及ぼすインパクトがいかに増大したかが、こうしたデータからも実感できる。ただし、海洋へ流出した固定窒素は、沿岸海域では濃度が高すぎていわゆる環境汚染を起こすが、一般に栄養塩が枯渇している外洋域では水産資源の増加に寄

与している可能性があるのですが、あながち無駄とは言えないかもしれないが。

以上本節で述べたことは以下の様に要約できよう。人類を含む大型哺乳動物の集団は、過去数千万年の間、陸上の利用可能な生物資源をほとんど限界まで消費して生存してきたと考えられる。約1万年前に大型草食獣を食べ尽くした人類は、やむなく草食動物に変身し、絶滅させた大型草食動物たちの餌場を農地に変えて、細々と農業をしながらしばらく大人しくしていた。しかしあるとき、地球の生命が数億年の時間をかけ蓄えてきた化石燃料を燃やしてエネルギーに変えるすべを学んだ人類は、化石エネルギー資源をふんだんに使って造った固定窒素を武器に緑の革命を起こし、爆発的に繁殖して世界にはびこることとなった。さらに、遺伝子組み換え作物に窒素肥料と除草剤をふんだんに浴びせて飼料作物を増産することによって、多くの人類が再び肉食動物に変身した。工業的窒素固定に依存する人類の繁栄は、持続可能どころか既に破綻が見えている。

本節の最後に、人類が主役となって最終氷期に始まった大量絶滅イベントのフィナーレはどんなことになるのか、予想してみよう。当面する最も深刻な問題の一つは化石燃料消費がもたらす地球規模の温暖化であろう。産業革命以前の炭酸ガス濃度は約 280 ppm (0.028%) であったが、現在は 400 ppm まで増加している。最悪のシナリオとして、採掘可能な化石燃料すべてを消費し、それが炭酸ガスとして大気中に放出されたとすると大気中の炭酸ガス濃度は約 2000 ppm になる。実際には、海水に吸収されたり堆積物中に固定されたりするので、そこまで大きくならないだろうと考えられているが、予測は難しい。炭酸ガス濃度が上昇すると何が起こるかは、先ず歴史に学ぶことが重要である。深海堆積物中に含まれるアルケノンは藻類の一種が作る生体脂質であり、その不飽和度から過去の大気中の炭酸ガス濃度を推定することが出来る。Zhang *et al.* (2013) はこの方法を用いて、過去 4000 万年間の炭酸ガス濃度の変動を復元した。彼等はこの結果と南極氷床の形成史とを比較して、もし炭酸ガス濃度が 700–800 ppm を越えると南極の氷が溶けだすと予想した (Zhang *et al.*, 2013)。南極の氷が全て溶けると約 70 m の海面上昇が起こるから、世界の大都市は水面下に没するであろう。気温もかなり高くなるだろうと予想される。人類の最も古い祖先・オーストラロピテクス (約 700 万年前) さえこの様な環境は経験していない。一人の地球科学者として私はこの結末を見届けたいと思う。しかし、孫や子の世代の行く末を考えると暗澹たる思いを禁じ得ない。

5. 減速社会をデザインする

以下に挙げる現象が人類紀大量絶滅イベントの最終段階で起こった：(1) 人口爆発、(2) 化石エネルギー資源の枯渇、(3) 土壌資源の枯渇、(4) 大気中の炭酸ガス濃度の増加、(5) 地球規模の環境汚染、(6) 所得格差の拡大、(7) 貧困、など。これらは互いに複雑な因果関係で結ばれているが、極端に単純化すれば、互いに正のフィードバックで結ばれた食糧増産と人口爆発の二者が、化石燃料大量消費、大気中の炭酸ガス濃度の増加、地球温暖化、地球規模の環境汚染、様々な社会問題等々を引き起こしたといえるであろう。

人類の長い歴史を通じて、世界の人口は獲得できる食料の量に律速されていた。これは、国民全体に基本的な教育が行き渡った一部の先進国を除けば、現在でも当てはまる；マルサスの唱えた人口論 (Malthus, 1798) は今でも活きている。前節の最後で述べた最悪のシナリオを避けるためには先ず、化石エネルギー資源に依存しない世界を実現しなければならないが、そこに収容可能な全人口は恐らく産業革命以前の人口とあまり変わらないだろう。人口を産業革命前の水準ま

で減らし、真に持続可能な世界を実現する道は決して明るくない。しかしそれは必ずしも苦痛を伴うとばかりは言い切れない。真に持続可能な社会は、限られた資源を効果的に分配しなければ実現できないから、必然的に格差の少ない平等な社会である。現代社会には絶対的な貧困がほとんどなくなったにもかかわらず、格差がもたらす相対的な貧困が拡大して様々な社会問題を生んでいることを考えれば（例えば、Wilkinson & Pickett, 2010）、それは物質的な貧しさを補って余りある幸福な社会であるかもしれない；農業以前の社会が（たぶん）そうであったように。

マルサスの人口論が生まれた背景にあったのは、世界に先駆けて産業革命が始まった 18 世紀末のイギリス社会である。1760 年から 1820 年の 60 年間に、工業製品の輸出とその対価による輸入増によって、イギリスの輸出入貿易額は 3 倍に達し、それに伴って自国の富を増やしていた（例えば、上田, 1930）。産業革命前の 1760 年に 600 万人であったイギリスの人口は、1820 年には 1,400 万人に増加したが、それは主として農村から都市への人口移動によって都市労働者階級の人口増加が起こったことによる。食糧増産に伴う農村人口の増加が産業革命を駆動したのか、あるいはその逆かは意見の分かれるところであるらしいが、両者の間に正のフィードバックが働くことは間違いないので余り本質的な問題ではない。要するに、都市は工業生産の場であり、そこでは多量の食糧と多数の労働者とを必要とし、その両方を「消費」する。当時は未だ化石燃料の利用が本格化していなかったから、利用可能な資源は限られていた。そのためにイギリスでは 1800 年頃既に、都市への人口集中の結果食糧不足と物価高騰が起こり、都市労働者は困窮していた。マルサスは、人口の動的平衡状態においては、人口抑制プロセスとしての飢えと貧困と戦争とが必然的に起こり、それは容認すべきものであると主張した（Malthus, 1798, 1800）。都市の人口を抑制するプロセスのうちで最たるものは戦争であるが、ほかにまだ重要なものが存在する。一つは火災である；木造家屋が密集する江戸の下町では、度重なる火災の都度数百～数万人の死者を出した（たとえば、西山, 1978）。もう一つの重要な人口抑制プロセスは伝染病である；密集して人が住む都市は、病原菌やウィルスの繁殖に絶好の環境だからである。地震災害や風水害等の自然災害も人口抑制プロセスに数えられる。この様なプロセスで減少した労働人口は農村からの流入によって補われ、結果として都市労働者の更新がおこなわれる。イギリスは、都市労働者への食糧供給を国内生産によって賄うことを諦め、1846 年に穀物税を全廃した；以後は工業製品の輸出で得た対価と植民地経営によって食料を獲得することとなった（上田, 1930）。

産業革命から始まった成長主義的世界観は、アジア・アフリカ・中南米に無限の市場と資源と労働力があると近似的に見なすこと、即ち世界経済が開放系であるとの仮定の下でのみ成りたつ事は明らかである。このうち、食糧資源については過去 100 年間化石エネルギーを大量に消費して一時的な急成長と増産を達成したが、それが破綻に至っていることを既に紹介した。国内での人口増加が頭打ちになった欧米の産業革命先進国では、しばらくの間移民によって労働力を補ってきた。第二次大戦後に「緑の革命」によってアジアや中南米諸国において起こった人口爆発は、欧米先進諸国にとって市場の拡大を意味しただけではなく、工業生産の場としての都市機能をこれら新興諸国の都市に肩代わりさせることが可能になったことを意味した。それは同時に、産業革命時代にイギリスの都市が抱えていた様々な社会問題が世界に拡散することを意味した。（付言すれば、この肩代わりを実現させるために不可欠なのが知的財産権を保護するための国際的枠組みを作ることであった。）

同様の問題は地球環境についても存在する。人為的な営みが環境へ与える影響が小さかった時代において、地球は開放系と見做し得た。しかし、化石燃料の消費によって大気中の炭酸ガス濃度が産業革命の前と比べて40%以上増加し、その効果がじわじわと体感できるまでになった今では、地球が閉鎖系であるという厳しい現実を受け入れざるを得なくなった。また、工業的に生産する窒素肥料の量が自然界で起こる窒素固定の全量に匹敵するまでに至った現在では、短期的な食糧増産を維持することが限界に達したことを既に本稿で論じた。

戦争や災害に頼ることなく世界の人口を産業革命前の状態まで減少させ、化石エネルギー消費を最小限に抑制した、真に持続可能な世界を構築する必要がある。しかし、それは如何なる世界であるべきなのか、またそれを構築する過程で何が起こるのかを予測することは困難である。その答えを得るには、歴史と自然のプロセスとに学ぶほかないであろう。今後に残された研究課題を思いつくままに挙げれば、(1) 緑の革命の検証、(2) 産業革命期の都市研究、(3) 産業革命期以前の社会における人口抑制に関する事例研究、(4) 過去1万年間の世界各地における農業慣行に関する事例研究、(5) 水田耕作における栄養元素循環の研究、(6) 土壌を介した地球表層の物質循環研究、(7) 生物学的土壌研究、(8) 様々な地形/地質/気候下における土壌更新プロセスの研究、(9) 極限環境における陸上生態系と土壌更新プロセスの研究、などである。しかし、当面最も重要なことは教育である。真に持続可能な世界を実現するためには、世界の大多数の人々が成長主義的世界観を捨てて減速社会を受け容れなければならない。そのために虚学が果たす役割は大きい。

引用文献

- 阿部 豊・田近英一 (2007): 大気の進化, 天気, **54** (1), 5–8.
- Alvarez, W., E. Kauffman, F. Surlyk, L. Alvarez, F. Asaro, H. Michel (1984): Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record, *Science* **223**, 1135–1141.
- Behar, D.M., R. Villems, H. Soodyall, J. Blue-Smith, L. Pereira, E. Metspalu, R. Scozzari, H. Makkan, S. Tzur, D. Comas, J. Bertranpetit, L. Quintana-Murci, C. Tyler-Smith, S.R. Wells, S. Rosset, and The Genographic Consortium (2008): The dawn of human matrilineal diversity. *American Journal of Human Genetics* **82**, 1130–1140.
- Bonato, S. L. and F. M. Salzano (1997): A single and early migration for the peopling of the Americas supported by mitochondrial DNA sequence data, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **94**, 1866–1871.
- Braje, T. J., and J. M. Erlandson (2013): Human acceleration of animal and plant extinctions: A Late Pleistocene, Holocene, and Anthropocene continuum, *Anthropocene* **4**, 14–23.
- Brown, L.R. (2014): Many Countries Reaching Diminishing Returns in Fertilizer Use, *Data Highlight* **43**, Earth Policy Institute, published on line, Jan. 08, 2014, at:
http://www.earth-policy.org/data_highlights/2014/highlights43
- Foucault, A., and N. de Noblet-Ducoudre (2005): Climate change at the origin of Eurasian mammoth extinction? *Second International Congress "The World of Elephants", Short Papers and Abstracts*, pp. 55–56, Hot Springs (SD), USA, 22-25 Sept., 2005.
- Fyfe, W.S. (1981): The environmental crisis: quantifying geosphere interactions, *Science* **213**, 105–110.
- Fyfe, W.S., B.I. Kronberg, O.H. Leonardos, and N. Olorunfemi (1983): Global tectonics and agriculture: a geochemical perspective, *Agriculture, Ecosystems and Environment* **9**, 383–399.

- Fyfe, W.S. (1989): Soil and global changes, *Episodes* **12**, 249–254.
- Gillespie, R. (2008): Updating Martin's global extinction model, *Quaternary Science Reviews* **27**, 2522–2529.
- Grayson, D.K. (2007): Deciphering North American Pleistocene extinctions, *J. Anthropological Research* **63**, 185–213.
- Green, R. E., J. Krause, S. E. Ptak, A. W. Briggs, M. T. Ronan, J. F. Simons, L. Du, M. Egholm, J. M. Rothberg, M. Paunovic, and S. Pääbo (2008): A complete Neandertal mitochondrial genome sequence determined by high-throughput sequencing, *Cell* **134**, 416–426.
- Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, D. A. Kring, M. Pilkington, A. C. Zanoluera, S. B. Jacobsen, W. V. Boynton (1991): Chicxulub Crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico, *Geology* **19**, 867–871.
- Hatfield, J. L., and J. H. Prueger (2004): Nitrogen over-use, under-use, and efficiency, *New Directions for a Diverse Planet, Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, 26 Sep – 1 Oct 2004, Brisbane, Australia.
- 堀米庸三 (1969): 虚学の精神あるいは学問の没意味生について, 季刊芸術 **10**, 36-42.
- 池田安隆 (1996) : 活断層研究と日本列島の現在のテクトニクス, 活断層研究 **15**, 93–99.
- 池田安隆, 岡田真介, 田力正好 (2012) : 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪み解放イベント. 地質学雑誌 **118**, 294–312. doi:10.5575/geosoc.2012.0018, 2012.
- Ikeda, Y. (2014): Strain buildup in the Northeast Japan orogen with implications for gigantic subduction earthquakes. *Episodes* **37**, 234–245.
<http://www.episodes.co.in/index.php/epi/article/view/57088/44558>
- 池田安隆 (2015): 「虚学の精神」再訪. 東京大学理学系研究科・理学部ニュース **47** (4), 3–3.
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/page/5091/>
- 池田安隆 (2016): 人類と自然災害, 科学 **86**, 1061–1064.
- 池田安隆 (2021) : ハルマゲドン地震仮説と 2011 年東北地方太平洋沖地震, コラボ **7**, 35–61.
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/cadasu/_pubinfo/-char/ja
- Iwase A., J. Hashizume, M. Izuho, K. Takahashi, and H. Sato (2012): Timing of megafaunal extinction in the late Late Pleistocene on the Japanese Archipelago, *Quaternary International* **255**, 114–124.
- Kasting, J.F. (1993): Earth's early atmosphere, *Science* **259**, 920–926.
- 菊池真夫 (1986) : 緑の革命技術の普及と評価 — フィリピン・ラグナ州における稲作 — , 農業総合研 **40** (1), 43–112.
- Klein, R.G. (2008): Out of Africa and the evolution of human behavior, *Evol. Anthropol.* **17**, 267–281.
- Koch, P. L. and A. D. Barnosky (2006): Late Quaternary extinctions: state of the debate, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **37**, 215–250.
- Krause, J., Q. Fu, J. M. Good, B. Viola, M. V. Shunkov, A. P. Derevianko, and S. Pääbo (2011): The complete mitochondrial DNA genome of unknown hominin from southern Siberia, *Nature* **464**, 894–897.
- Malthus, T.R. (1798): *An Essay on the Principle of Population*, J. Johnson, London.
- Malthus, T.R. (1800): *An Investigation of the Cause of the Present High Price of Provisions*, J. Johnson, London.
- Martin, P. S. (1966): Africa and Pleistocene overkill, *Nature* **212**, 339–342.

- Martin, P. S. (1973): The discovery of America, *Science* **179**, 969–974.
- Mehring, B.L., J.R. Adams, and K.D. Jacob (1957): *Statistics on Fertilizers and Liming Materials in the United States*, Statistical Bulletin **191**, Soil and Water Conservation Branch, Agricultural Research Service, USDA, 182 pp.
- Montgomery, D.R. (2012): *Dirt: The Erosion of Civilizations*, University of California Press, 285 pp.
- 松本 良・浦辺徹郎・田近英一 (2013) : 「惑星地球の進化」(改訂版), 放送大学教育振興会, 296 pp.
- マリー＝モニク・ロバン (2015 ; 戸田 清監修, 村澤 真保呂, 上尾 真道訳) : 「モンサント—世界の農業を支配する遺伝子組み換え企業」, 作品社. (原著 : Robin, Marie-Monique, 2008, *Le Monde selon Monsanto*, coédition ARTE éditions / La Découverte.)
- 西山松之助・編 (1978) : 「江戸町人の研究, 第5巻」, 吉川弘文館, 565 pp.
- Okada, S. and Y. Ikeda (2012): Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan. *J. Geophys. Res.* **117**, B01404. doi:10.1029/2011JB008355
- 大河内直彦 (2016) : 人類紀を生きる : 室素編, 科学 **86**, 196–198.
- 大崎 仁 (1999): 「大学改革 1945~1999」, 有斐閣, 350 pp.
- 大崎 仁 (2001): 「国立大学法人の形成」, 東信堂, 230 pp.
- Raup, D.M., and J. J. Sepkoski Jr. (1982): Mass extinctions in the marine fossil record, *Science* **215**, 1501–1503.
- Roberts, D.G. & A.W. Bally, eds. (2012): *Regional Geology and Tectonics*, Vols. **1A–1C**, Elsevier.
- Rose, J. I., V.I. Usik, A.E. Marks, Y.H. Hilbert, C.S. Galletti, A. Parton, *et al.* (2011) The Nubian Complex of Dhofar, Oman: An African Middle Stone Age industry in southern Arabia, *PLoS ONE* **6**(11): e28239.
- 斎藤一夫・編 (1972) : 「緑の革命とアジア農業」, アジア経済研究所/アジア経済出版会, 212 pp.
- Sandom, C., S. Faurby, B. Sandel, J.-C. Svenning (2014): Global late Quaternary megafauna extinctions linked to humans, not climate change, *Proc. Roy. Soc.* **B 281**: 20133254.
<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.3254>
- Schlesinger, W. H. (2000): Carbon sequestration in soils: Some caution amidst optimism, *Agric. Ecosyst. Environ.* **82**, 121–127.
- Schlesinger, W. H. (2008): On the fate of anthropogenic nitrogen, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106**, 203–208.
- Schopf, J. W. and B. M. Packer (1987): Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia, *Science* **237**, 70–73.
- Schopf, J. W. (1993): Microfossils of the Early Archean Apex Chert: new evidence of the antiquity of life, *Science* **260**, 640–646.
- Sepkoski, J. J., Jr. (1984): A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity, III, Post-Paleozoic families and mass extinctions, *Paleobiology* **10**, 246–267.
- Smil, V. (2001): *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, MIT Press, 358 pp.
- Stallman, R. (1983). *Initial Announcement. GNU's Not Unix! Free Software, Free Community.*
<http://www.gnu.org/gnu/initial-announcement.html>
- 田口賢士・西村ミチコ (2000) : チリ硝石産業と硝石輸送の時代背景 (1) — 産業革命と農業革命 —, *らん* **47**, 57–66.
- 高橋英一 (2005) : 歴史の中の肥料 [4], アンモニア合成への道 (2), *農業と科学* **568**, 1–5.

- 高井康雄 (1980) : 水田土壌の動態に関する微生物学的研究 I , 肥料化学 **3**, 17–55.
- 高井康雄 (1981) : 水田土壌の動態に関する微生物学的研究 II , 肥料化学 **4**, 1–48.
- 上田貞次郎 (1930) : 「産業革命史」, 経済学全集 **39**, 改造社.
- 梅原弘光 (1978) : フィリピンにおける「緑の革命」と農民 — 中部ルソン, ヌエバ・エシハ州の一村落事例を中心として — , アジア経済 **19** (9), 26–40.
- 梅原弘光 (1993) : フィリピン農村社会変化に関する一考察 , アジア経済研究所・研究双書 **431** 「東南アジア農村階層の変動」, 61–87.
- United Nations (1999): *The World at Six Billion*, 11 pp.
<http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbilpart1.pdf>
- U.S. Census Bureau (USCB) (2006): *Total Midyear Population for the World: 1950-2050*,
<http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbilpart1.pdf>
- Vita-Finzi, C. (1969): *The Mediterranean Valleys: Geological Changes in Historical Times*, Cambridge University Press, 150 pp.
- Wilkinson, R., and K. Pickett (2010): *The Spirit Level: Why Equality is Better for Everyone*, Penguin Books Ltd, England, 375 pp.
- Woese, C. R., and G. E. Fox (1977): Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **74**, 5088–5090.
- Woese, C. R., O. Kandler, and M. Wheelis (1990): Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains, Archaea, Bacteria, and Eucarya, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **87**, 4576–4579.
- Yoshikawa, T., S. Kaizuka, and Y. Ota (1964): Crustal movement in the Late Quaternary revealed with coastal terraces on the southeast coast of Shikoku, Southwestern Japan. *J. Geod. Soc. Japan* **10**, 116–122.
- 吉川虎雄 (1968) : 西南日本外帯の地形と地震性地殻変動. 第四紀研究 **7**, 150–170.
- Zhang Y. G., M. Pagani, Liu Z, S. M. Bohaty, R. DeConto (2013): A 40-million-year history of atmospheric CO₂, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **371**: 20130096.