

## 『地球環境学入門』補遺

### The addendum of “Introduction to Global Environment Studies”

東樋口 護

TOHIGUCHI Mamoru

**要旨：**本稿は『地球環境学入門』の補遺である。『地球環境学入門』は「環境学概論」15回の講義の教科書として、環境学のフレームワークを示しつつ、できるだけ広範な基本事項について記述したものである。紙幅の制約もあり、ふれることの出来なかった事項や意を尽くせなかった部分も多い。ここで扱う事項は、①地球温暖化・気候変動に対する懐疑論、②地球システムとエントロピー、③世界人口の定常化、④地球環境世紀の行方の4項目である。

**【キーワード】**『地球環境学入門』補遺、懐疑論、エントロピー、人口定常化、地球環境世紀

**Abstract：**This paper is the addendum of “Introduction to Global Environment Studies”. It’s volume was restricted and some important subjects had to be left. In this paper four subjects are described, 1: the difficulty to understand climate change problem and the skepticism about it, 2: globe system and entropy, 3: population stabilization and steady-state economy, 4: global environment problem and the world in 100 years.

**【Keywords】** “Introduction to Global Environment Studies” addendum, climate change skepticism, entropy, population stabilization, world in 100 years

はじめに

『地球環境学入門』は、「環境学概論」のテキストブックとして書かれた。この特別寄稿は、その補遺である。『地球環境学入門』というのは、たいそうな名前であるが、「環境学概論」という講義名よりは、通りが良いということでこの名前になった。

鳥取環境大学赴任以来、地球環境問題について学習し思索してきた内容とそれをもとにした「環境学入門」「環境学概論」の講義内容をとりまとめたものである。

テキストブックであるから、ある安定した内容と基礎事項が含まれていなければならない。また、その講義が目指すところを満たせるような体系、そこまで行かなくてもある一定の範囲を網羅していなければならない。あくまで、特論ではなく、概論としての立場をとらなければならないと考えた。

そこで、その構成と内容は、なるべく確実性の高い基

礎的な事項を取り上げること、また、なるべく広範な関連領域について取り上げることという二つのある種のバイアスがかかったものとなった。

- ・環境とは何か、地球環境とは何か
- ・環境主義へ、地球有限主義への二つの画期
- ・地球環境問題とは何か、地球温暖化とは何か
- ・地球は、有限・絶妙・微妙なシステム
- ・人類は環境にどう適応してきたか
- ・森林の開発と破壊によって都市文明を築いてきた
- ・経済と環境の調和は可能か
- ・環境問題は市場に任せることができない
- ・持続可能な発展は可能か
- ・環境は誰のものか
- ・現代環境思想の課題は何か
- ・社会の発展と豊かさをどうはかるのか
- ・私たちはどう生きるのか

という各講の問いかけは、読者に対する呼びかけであるとともに環境問題に対して続けてきた自問でもある。

そしてもう一つ、環境学とは何か、これらの問いかけを各論として、体系化を図れば環境学となるのかということであった。

これらに対する『地球環境学入門』における結論は、環境学は、医学が基礎医学と臨床学からなるように、環境基礎学と環境問題解決学の2層からなる、いわば「地球の医学」であり、図0-1に示すような「有限な地球システムの開かれた下位システムである人間社会の持続可能性」の学ということである。

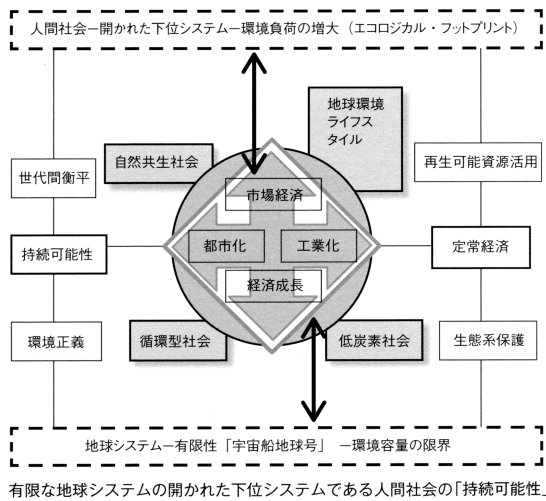


図0-1 地球環境学のフレームワーク

この図に示す事項それぞれが地球環境学のいわばサブシステムであり、それぞれの探求が重要課題である。それ以上に難しいのはこれらの相互関係の追求である。続けられている多くの研究と実践が次第に形を整え、地球環境問題の明確化と解決が進行するとともに、環境学の形も一層が明らかになっていくものと期待を寄せている。

本稿では、『地球環境学入門』で割愛せざるを得なかった懸案事項のいくつかについて補遺としてとりまとめておく。

**補遺 1：地球温暖化問題の難しさ・さまざまな懐疑論**

地球温暖化あるいは気候変動は広く理解されるようになり、さまざまな取り組みも進み出している。とはいえ、一方でこの問題特有の難しさもあって、CO<sub>2</sub>温暖化説に対する懐疑論も根強い。

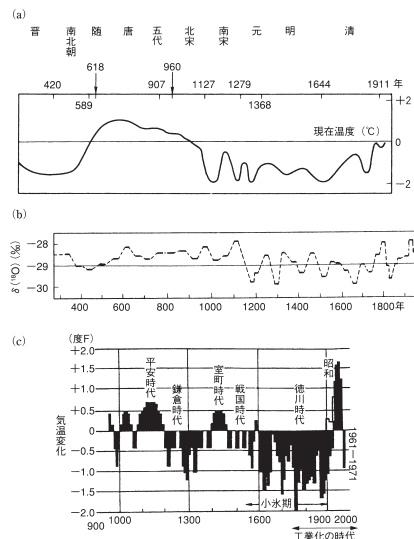
地球温暖化問題は、他の環境問題とは異なり、問題が表面化する以前に科学者の将来予測と警告に基づいて社会が対応を始めた問題である。

そして、①そのメカニズムが複雑であり、容易に理解できない、②地球システムの巨大なシステムの科学的な不確実性を内包している、③被害の実態が地域により異なり徐々に進行する性質を持ち、また温暖化に起因するものか他の自然災害か区別がつきにくいなどから被害の実態がつかみにくく実感を持ちにくい、④対策の決定打がなく、総合的・国際的な対策を必要とする、⑤その問題構造は、産業革命以降の近代化とそのライフスタイルを超越していくという価値観の問題にまで及んでいる。これらのさまざまな要因が、この問題の難しさを生みだしている。そしてさまざまな懐疑論を生み出すことにもなっている。

**1-1 過去1万年・1600年の気候変動**

気候変動は、過去の歴史の中で繰り返されてきた。産業革命以前の間活動がそれほど大きなものでなかった時期の気候変動がどのようなものであったのか。自然のリズムの中で、地球の気候がどのように変動してきたのか。

過去1600年の気候変動の記録を、中国の古記録からの復元、グリーンランドの氷床アイスコアの酸素同位体からの復元とそれに基づいた気温の変動を示したのが図1-1である。

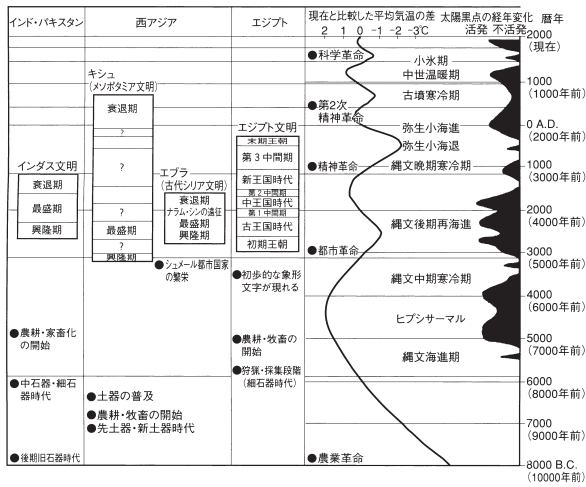


過去約1600年の気候変動の記録。(a) 中国に残された古記録に基づいて復元された気候変動(竺可楨による)；(b) グリーンランドの氷床のアイスコアの酸素同位体から復元された気候変動のパターンと、(c) それに基づき推定された気温の変動(ダンスガードによる)。(板井邦明『地球環境をつくる太陽』地人書館、1990)

図1-1 過去1600年の気候変動

グリーンランド氷床からの推定は、中国の古記録やヨーロッパの変動とよく一致している。

また、過去1万年の気候変動を示したのが図1-2である。6000年前の縄文時代には、地球は現在よりも暖か



過去1万年の気候変動と人類の歴史。(小泉格『講座 文明と環境 1 地球と文明の周期』朝倉書店、1995)

図1-2 過去1万年の気候変動

く(1℃ぐらい高温)、海水面は現在よりもずっと高かったといわれる(「縄文海進」)。最終氷河期の2万年前には大陸氷河に覆われ、海水面は100メートルも低かった。

これらの図は、過去の気候変動が大きなものであったことを示している。それでも現在と比べてプラス1℃から2℃であった。

「IPCC 第5次報告」ではこのままで推移すると21世紀末には4℃の気温上昇があると予測し、これを2℃未満に抑えても悪影響は甚大であること、4℃上昇すると取り返しのつかない悪影響があること、2℃未満に抑えることはまだ可能だが、エネルギーの根本的な変革と温暖化ガスの排出を抑える政策と国際協調が不可欠だとしている。

この気候変動の外部要因のうち自然起源のものは、次のようにまとめられる。

① 太陽放射量の変動

太陽放射量は、地球誕生の46億年前には、現在の60%であったと推定されている。それ以降、徐々に増大して現在に至っている。この太陽常数(地球表面の単位面積に垂直に入射する太陽エネルギー、現在の値:約1.366w/m<sup>2</sup>)は10年から数百年の周期で変動している。

② 地球の軌道要素の変動

地球の公転軌道の変化も地球が受容する太陽放射量を変動させる。また、地軸の傾きもあり、これらの軌道要素の変動は、数万年から数十万年の単位での受容量変動をもたらしている。

③ プレートテクトニクスによる変動、地球内部からの熱と揮発成分の放出

大陸の分裂や衝突、山脈の形成と隆起、海洋底の拡大と火山活動による熱・二酸化炭素の放出など。数百万年

から数千万年の時間スケールで変動している。

④ 大規模火山活動

大規模な噴火による火山灰の日傘効果。火山活動が飢饉を引き起こした歴史上の事例はたくさん記録されている。突発的な変動を引き起こす。

1-2 温暖化についての理論の経緯

地球は太陽の放射エネルギーを吸収して暖まり、その温度によって決まる赤外放射エネルギーを放出してエネルギーバランスを保っている。吸収・放出バランスから-18℃となるが、33℃の温室効果によって平均気温15℃になっている。

(1) 温暖化理論前史

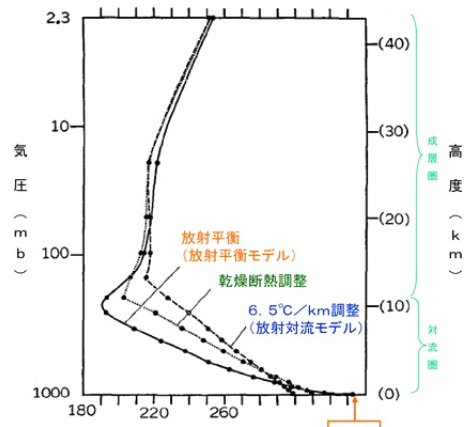
太陽エネルギーの放射バランスから地表面温度が求められることをはじめて論じたのが、フーリエ級数・フーリエ積分で知られるフランスの数学者・物理学者のフーリエ(Jean Baptiste Joseph Fourier) (1768~1830)である。熱伝導を偏微分方程式の境界値問題として扱えることを示した。

イギリスの物理学者チンダル(John Tyndall) (1820~1893)は、水蒸気と二酸化炭素が大気赤外放射エネルギーを吸収することを明らかにした。

そして、水素イオンを出す酸と水酸イオンを出す塩基の酸塩基理論を提起したスウェーデンの物理化学者アレニウス(Svante August Arrhenius) (1859~1927)は、二酸化炭素の変化が地上気温の変動をもたらした可能性を論じ、人間活動による二酸化炭素が地球の温暖化をもたらすと予想した。

(2) 真鍋・Wetheraldの鉛直1次元放射対流平衡モデル

真鍋淑朗等は、放射・対流を考慮した鉛直1次元モデル



破線、点線、実線はそれぞれ6.5°C/kmの臨界減率、乾燥断熱臨界減率(1.0°C/km)の熱平衡、および純粋な放射平衡  
S. Manabe and R. Strickler, Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 21, July 1964, p361-385 の図4を加工

図1-3 真鍋の1次元放射対流平衡モデル

ルを、1967年に発表した。それが、図1-3である。北緯35度の4月の鉛直方向の気温分布を示している。

放射平衡（鉛直方向のエネルギー伝達として放射だけを考え、各層それぞれのエネルギーの出入りが釣り合った状態）で見ると、地表面温度が59℃になり極端に高くなる。次の乾燥断熱調整（乾燥した大気対流を加味）した場合、27℃となる。放射対流平衡（各層について放射も対流も考慮）の雲ありでみると、図1-4のように15℃となり、実際の温度とよく合う。

そして、真鍋モデルによると、二酸化炭素濃度が2倍になれば、地表気温が2℃上昇することになる（図1-5）。

これらの図は、二酸化炭素排出温暖化の懐疑論を展開

している井上雅夫の「二酸化炭素は本当に地球温暖化の原因か？」(http://www.venus.dti.ne.jp/~inoue-m/on\_co2\_3.htm#23)の温暖化ツイッター小説第11集「放射対流モデル」の図を借用している（井上は真鍋モデルを支持）。

この真鍋・Wetheraldモデル（鉛直1次元放射対流平衡モデル）が、二酸化炭素が増えるとどのくらい気候が温暖化するかという定量的な見通しを得るための画期的な基礎を与えることになった。

そして、これが現在の3次元気候モデル（大気・海洋結合モデル）へと発展し、温暖化予測に用いられている。

(3) 地球の熱的平衡

真鍋モデルの基になっているのは、地球の熱的平衡の理論である。地球の表面温度、気候は太陽からのエネルギーと地球からの熱放射のバランスによって決まっている。太陽も地球もエネルギー放射からは近似的に電磁波を完全に吸収・放射する理想的な物体であるところの黒体と見なすことができる。黒体の放射エネルギーは、絶対温度Kの4乗に比例する（ステファン・ボルツマンの黒体放射のT<sup>4</sup>法則）。

地球表面に入るエネルギーと地球からの放射エネルギーのバランスを考える。地球表面に入るエネルギーは太陽常数から反射分を差し引いて求めることができる。地球からの放射は表面温度の4乗に比例する。これらから、放射平衡モデルの式を求めることができる。これが、真鍋モデルの放射平衡モデルとなる。これに対流を考慮したものが放射対流モデルとなり、そこに二酸化炭素の効果を計算し、先の二酸化炭素濃度の影響の結果を得たのである。

(4) 気候モデル

日本の気候モデルは、MRI（気象庁気象研）モデル、CCSR/NIES/FRCGC（東大気候システム研・環境研・地球フロンティア）モデルなどである。

『地球環境学入門』で取り上げているIPCC第4次報告の温暖化予想も、放射強制力の変化予測と、こうした気候モデルに基づいたシミュレーションによっている。

鉛直1次元モデルでしか計算できなかった真鍋モデルの時代と比べて、コンピュータ技術は格段に進歩した。大気・海洋・陸面を規則的に配列した格子点で覆い、格子点間のエネルギー収支を計算する。この格子点間隔よりも小さいスケールでのエネルギー輸送効果も考慮する必要があるが、この効果を格子点による変数で表す方法はまだ確立していないという。この方法の違いが気候モデル間の予想結果のばらつきとなっている。

図1-6は、気象研究所気候モデルで計算された、二酸化炭素が年率1%で増加した場合の100年後の予想である。

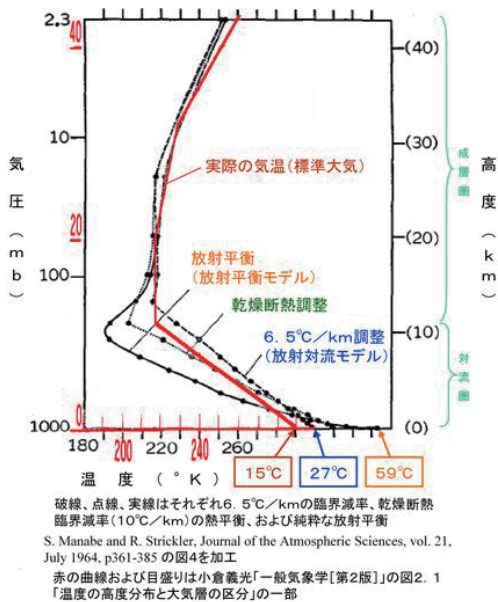


図1-4 雲ありの真鍋モデル

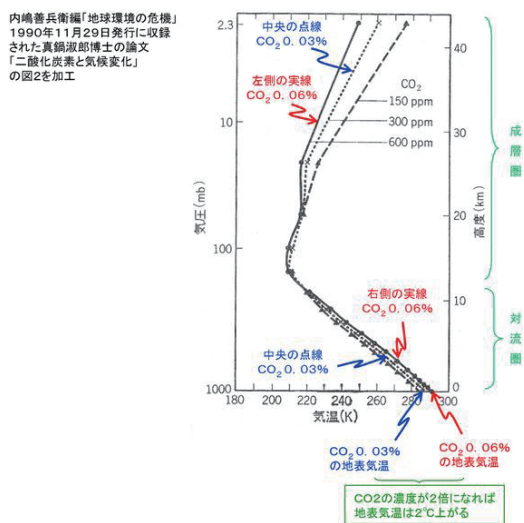
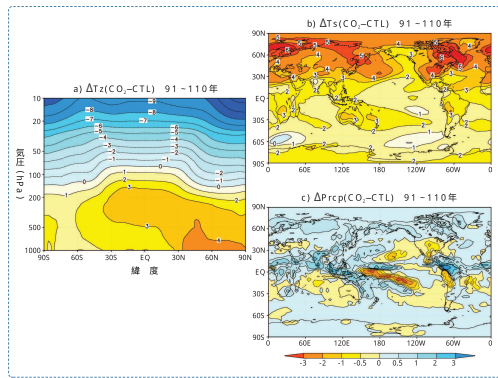


図1-5 真鍋モデル二酸化炭素濃度と気温の関係



気象研究所気候モデルで計算されたCO<sub>2</sub> 1% / 年(権利) 漸増による100年後(91~110年の20年平均)の a) 東西年平均平均気温の変化(ΔTz; °C)の子午面分布、b) 全球年平均地上気温の変化(ΔTs; °C)の地理分布とc) 降水量の変化(ΔPrp; mm/日)の地理分布。(野田, 2000)

図1-6 気象研究所気候モデルで計算した100年後

- a 図 (東西年平均平均気温の変化の子午面分布) : 対流圏では温室効果によって気温が上昇、成層圏では下降する。北極域の対流圏下層で大きく温度上昇する。
- b 図 (全球年平均地上気温の変化) : 高緯度の昇温は、北半球で大きい。
- c 図 (降水量の変化の地理分布) : 温暖化により水蒸気の横向き輸送量が増大し、降水は高緯度で増加するなど。

1-3 温暖化に対する否定論・懐疑論

地球温暖化に対して、さまざまな懐疑論が出されている。IPCC 第4次報告の小さな過誤や「メールゲート事件」などが派手に取り上げられ、あたかも温暖化そのものが間違いであるかのごとく扱われたりする。

温暖化・気候変動に関する異常気象の出現などの事態の進展や問題に対する理解の広がりがあるものの、前述のような温暖化の問題構造から、また、南北問題、化石燃料関連諸企業のロビイスト活動、経済成長の継続イナーシャ、短・中・長期のステイクホルダーの対立構造などから、温暖化に対する懐疑論は消えることがない。

懐疑論はいくつかのタイプに分かれる。①理論とシミュレーションを否定するもの、②温暖化は問題ではないというもの、③その他温暖化対策に対する批判など。

(1) 真鍋説についての榎田の否定的批判

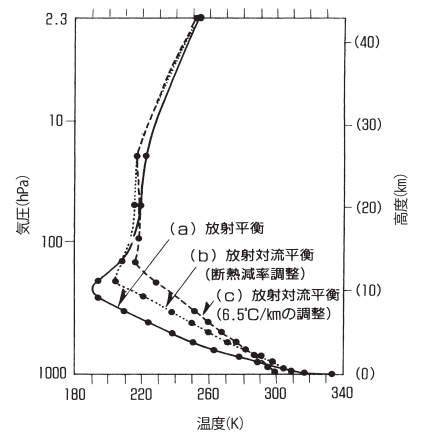
『資源物理学入門』の著者榎田敦は、『CO<sub>2</sub>温暖化説は間違っている』などの著作で、精力的に真鍋説否定論を展開している。その論の中心は、「図1-7 (図1-3と同じもの)の真鍋モデルの(a)放射平衡で計算して地表面温度60℃となる、その後もこの放射モデルを使い続けている」と事実(上記真鍋モデルの項)に反する批判をしているのである。また、温暖化予想におけるコンピュータシミュレーションをほとんど否定している。否定の論拠は誤っていると思うが、理論物理学者の論であるだけにその影響は大きい。

榎田は図1-8から気温変化が原因でCO<sub>2</sub>濃度変化が結果だとも主張している。しかし、この図は、CO<sub>2</sub>濃度の長期的上昇傾向を除いた図であり、人間活動による地

球温暖化とは関連の少ないものであるし、気候モデルによるシミュレーションでは、20世紀での気温上昇をよく再現でき、20世紀後半CO<sub>2</sub>が原因で温度上昇が結果であることがわかってきている。

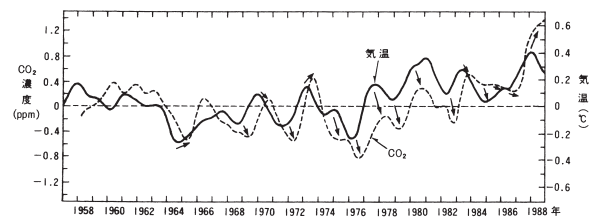
なお、気温変化が先で、二酸化炭素濃度の変化が後だという「二酸化炭素による温暖化否定論」は多い。井上雅夫のツイッター小説第7集「二酸化炭素犯人説の嘘」も、これと同じ論理である。南極氷床コアをもとにしたIPCCの60万年前からという超長期の変化の図(IPCC第4次報告書・第一作業部会)から温度変化が先だと論じている。

自然界にはCO<sub>2</sub>が増えると気温が上がることと、気温が上がるとCO<sub>2</sub>が増えるという両方の仕組みがある。前者は温室効果であり、後者は気温上昇によって植物の呼吸と土壌有機物の分解が促進されCO<sub>2</sub>吸収が抑制されるためCO<sub>2</sub>濃度が増えるという関係である。気温上昇はCO<sub>2</sub>濃度を上昇させ気温上昇を増幅させる。どちらが先という問題ではない。



中緯度地帯の代表的条件に対応する放射平衡および放射対流平衡にある大気温度の高度分布 (Manabe, S., J.Atmos.Sci.21 [1964] P.370) (近藤洋輝著『地球温暖化予測がわかる本』成山堂 P.42より)

図1-7 真鍋放射対流モデル(図1-3と同じ)



気温変化とCO<sub>2</sub>濃度変化の関係(キーリング 1989) (根本順吉著『超異常気象』中公新書 P.213より)

CO<sub>2</sub>は気温の上昇より遅れて変化している(矢印は根本順吉による)。原因が後に、結果が前に現れることはないから、気温の変化が原因でCO<sub>2</sub>濃度の変化が結果であることが分かる。

図1-8 気温変化とCO<sub>2</sub>濃度変化

(2) その他の懐疑論

「温暖化は怖くない、むしろ寒冷化こそが問題だ。」食料生産に直接影響する寒冷化の方が問題だと植田は主張している。だからといって温暖化の問題はなくなるのだが。

この寒冷化の方を問題にし、あたかも温暖化は問題ではないというような主張は植田の他の論者にも多い。例えば、構造主義生物学者の池田清彦の論調もこれである(池田清彦(2010)『新しい環境問題の教科書』, 新潮文庫, など)。

「地球は温暖化と寒冷化を繰り返してきた。」だから温暖化は問題ではないという論も根強くある。産業革命以降の人為起源のCO<sub>2</sub>濃度上昇の問題は、前述の長期の気候変動要因とは異なる。人為起源による急激な温暖化ガス濃度の上昇問題がなくなるわけではない。

その他にも、「CO<sub>2</sub>排出削減は、原発支持の陰謀」「現在のCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みはどれほどの効果があるのか。日本はばかげた取り組みを強いられている」など、さまざまな懐疑論が出されている。

しかしながら「環境問題には嘘が多い」という指摘には、傾聴に値するものもある。例えば、「電気自動車は環境にやさしい」という命題は、完全に証明されているとはいえない。電気をつくるのにはエネルギーも資源も必要であり、その過程でCO<sub>2</sub>を排出する。化石燃料に依存する電気である限り、電気だからといって手放して環境にやさしいというのは間違いである。

水素エネルギーについても、水素の発生を化石燃料による電気に依存する限り、同じである。エネルギー利用に関して、迂回すれば迂回するほどその生産過程でエネルギーロスを起こす。電気に関していえば、自然エネルギーによる電力を使えば、環境にやさしいということができる。その場合も、太陽光パネル・風力発電装置などのライフサイクルコスト・CO<sub>2</sub>排出をより小さくする必要がある。

「ゴミの分別・リサイクルはうまく回っていない、無駄だ、気休めだ」という指摘は多い。環境対策の制度・システムが必ずしもその意図する効果を上げていないという指摘である。こうした環境対策の制度・システムは、その意図する目標だけで判断することはできないというのはうなずける。

1-4 まとめ

さまざまな懐疑論・否定論にもかかわらず、有限地球の「成長の限界」という枠組は変わらないし、産業革命以降のCO<sub>2</sub>濃度の上昇とそれが人為起源によることの

確からしさは揺るがない。

それでも「環境問題には嘘が多い」という指摘には冷静に検討しなければならないものも多い。特に対策や政策に関して「〇〇は環境にやさしい」という感覚的な表現には注意が必要である。

補遺2：エントロピーの視点

—地球システムとリサイクルの理解

地球気候や温暖化のメカニズムを理解するためには、地球システムを熱機関として見る必要がある。ここでは基礎的な地球の熱収支とエントロピーについて考えておく。また、リサイクルをエントロピーの視点から検討しておく。

2-1 熱力学の第二法則

熱は移動する。エネルギーは移動する。その事によって、地球は太陽から熱エネルギーを受け取り、適度な暖かさを保つことができる。熱は、高温物体側から低温物体側へ移動する。このことを「熱力学の第二法則」と名付けたのが、19世紀の物理学者、英国のトムソンとドイツのクラウジウスである。トムソンは、ケルビン卿の別名で知られる。絶対温度Kはこのケルビン卿のKである。

クラウジウスは、フランスの物理学者カルノー(カルノー・サイクル)の熱機関の効率研究を検討し、(熱量を絶対温度で割った商)が重要であることに気付き、これを「変換」を意味する「トロペ」とエネルギーを合わせた「エントロピー」と名付けた。1865年、チューリッヒ哲学学会の論文ではじめてエントロピーという用語を用いた。

「世界のエネルギーは一定である。世界のエントロピーは最大値に向かって増大する」というのである。この世界というのは、閉じた世界、閉鎖系のことである。

高温 T1の水と低温 T2を一つの容器に入れる。高温側から低温側へ熱は伝わり高温と低温の温度差は次第になくなる。熱エネルギーは容器が外部から閉鎖されている限り増えも減りもしない。q カロリー高温から低温へ移動したとすると、エントロピーは、 $-q/T1 + q/T2 > 0$  (T1>T2) だけ増える。エネルギーは保存されるが、エントロピーは増大するのである。

2-2 「地球は生きている」というのは、単なるレトリックではない

地球は太陽から莫大な量の熱エネルギーを受け取り続けてきたが、多種多様な生物が繁栄する天体である。それは、地表が受け取る太陽エネルギーQが地表面温度を

平均15℃ (288K) にし、大気の大気対流と水循環によって、宇宙空間へ輻射熱を放出しているからである。その時の温度は-18℃ (255K) である。

エントロピーの受け取り量は  $Q/288$  で、放出量は  $Q/255$  である。エントロピーの受け取り量+エントロピーの増大量=エントロピーの放出量となり、地球上の活動によるエントロピーの増大量を宇宙空間に放出していることになる。このエントロピーの収支均衡が、地球上の活動を維持することを保証している (図2-1)。

地球は地表が受け取る太陽エネルギーを水循環・対流によって宇宙空間へ輻射熱として放出し、増大するエントロピーを放出している。これが、地球が「開放定常系」であり、熱死しないで生きているということである。

この開放定常系の理論を明らかにしたのは植田敦であり、この開放定常系理論は、自然と物質代謝を踏まえて社会経済を捉える「生命系の経済学」「循環の経済学」へ引き継がれている。

太陽から地球に到達するエネルギーは地表1平方センチメートルあたり1年に259カロリーで、これを「太陽常数」という。0.3は鏡面反射され、0.7は地表に吸収された後、熱輻射で宇宙空間に出て行く。ステファン・ボルツマンの黒体輻射の  $T^4$  法則 (SB 法則) を、岩石だけの地球に当てはめると地表平均温度は255K (-18℃・月は-16℃) となる。

大気が直射日光を23吸収し、地表の日光の吸収47と温室効果96を合わせて143となる。大気の大気対流分6を差し引いて  $143 - 6 = 137$  にステファン・ボルツマンの黒体輻射の法則を当てはめると、301K (28℃)。水循環・蒸発分24を差し引いて  $137 - 24 = 113$  にSB法則を当てはめて、288K (15℃) となる。宇宙への放射70から長波長の輻射熱は255K (-18℃) となる (図2-2、図2-3)。

$Q = 77\text{kcal/cm}^2 \cdot \text{年}$ 、エントロピーの受け取りは

$77\text{k}/288\text{K} = 267\text{cal/deg}\cdot\text{cm}^2 \cdot \text{年}$ 、エントロピーの放出は  $77\text{k}/255\text{K} = 302\text{cal/deg}\cdot\text{cm}^2 \cdot \text{年}$  であり、 $302 - 267 = 35$  で、これだけエントロピーを捨てている。

この捨てている量は地球上で増大させているエントロピーと釣り合っているのか？地球上の人口が増大し活動が大きくなったときのエントロピーの放出はどうなるのか？温室効果が大きくなり地表温度が高くなったときには収支バランスはどうなるのか？これらについては、私にはまだ判断できない。

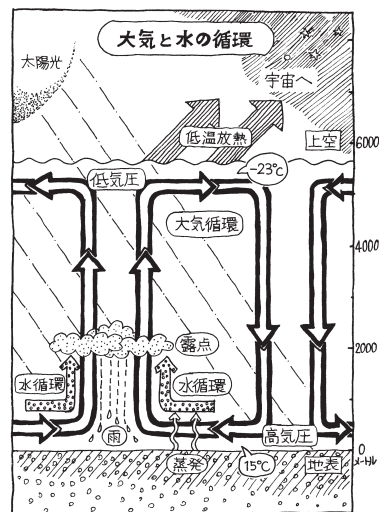
地球温暖化とエントロピー収支との関係は簡単ではない。「温暖化とはエントロピーがたまることで、住みにくくなることだ」とはいえない。もしそうなら寒冷化する

	入 力	出 力
宇宙	入射 100 - 反射 30 = 70	熱放射 64 + 熱放射 6 = 70
大気	↓ 23 (2°C)	↑ 64 (23°C) 熱放射 ↑ 6 熱放射 ↑ 107 (大気・水循環)
地表	47 + 96 = 143 日光の吸収 温室化効果	24 + 6 + 113 = 143 蒸発 空気への伝導 熱放射

地球の平均熱収支

地球の平均熱収支  $0.343\text{kW/m}^2 (0.49\text{cal/cm}^2/\text{min})$  を 100 とした。片山：日本気象協会報告書 (1975) に加筆作成、カッコ内の数値は熱放射の温度。

図2-2 地球の平均熱収支



大気の循環と水の循環 (植田敦『エコロジー神話の功罪』P.125)

地球エンジンは大気と水の循環により成立する。この循環は、伝熱と蒸発により地表から15℃の熱を得て、マイナス23℃の大気上空へ運び上げ、そこから宇宙へ低温放射する。この大気と水の循環が、余分のエントロピーを処分するので、地球上に生命が存在できるのである。

図2-3 大気・水の循環

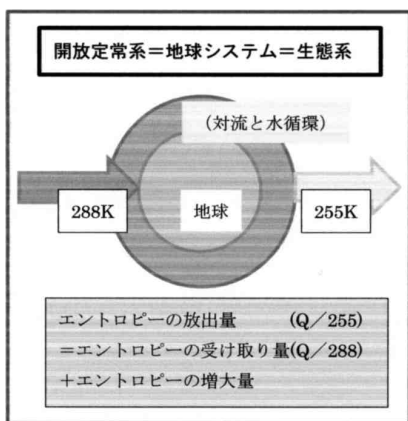


図2-1 開放定常系としての地球システム

るほどエントロピーが少なくなって住みよくなるはずである。

しかし、そんなことはない。もし、温暖化が人間活動によるエネルギー資源の消費によって生じる廃熱がたまる問題だといえれば、それは温暖化であり、エントロピー問題であるといえる。しかし、現実のエネルギー資源消費による廃熱の増加は、温室効果物質の増加による影響よりはるかに桁が小さい。

温暖化は大気中に赤外線を受取り・放出する物質が増えることであるが、これは宇宙に電磁波を出す温度を高めることになり、地表付近で発生するエントロピーを宇宙に放出することを難しくするだろうといえる。そして、地表付近での温度上昇は熱機関から取り出す有用な仕事が増えることになろう。この両方の効果は競合するので、人間社会にどのような影響を与えるかはこれだけでは判断できない。

地球は、以上で見たように、太陽（約6,000K）と宇宙空間（約3K）の間に存在し、太陽から来る電磁波を受取りるところの温度、平均して290K と地球が出す電磁波、約255K の差によってつくられる熱機関である（図2-4）。

2-3 生産者・消費者・分解者とエントロピー増大

エントロピーは、熱・物質の分子レベルでの拡散の指標であり、複雑さ・でたらめさが増すほどエントロピーは増大する。

地球の表層では、熱平衡と離れた生命活動や社会活動が営まれている。生物は、環境から物質・エネルギーを取り入れ変換することによって、生体を形成して生命活動を維持している。そして、生体内で発生するエントロピーを、廃熱・廃物として生体外に排出して一定の秩序を維持している。

植物は、太陽エネルギーを吸収し、水・炭酸ガスなどの無機物から炭水化物という有機物を合成している。この炭水化物・ビタミン・タンパクなどは高エネルギー低エントロピー物質である。消費者である動物は、植物を摂取して生命活動を行い、エントロピーを増大させ、廃物・廃熱を排出する。廃物は分解者である土壌・土壌微生物によって分解され、再び植物に吸収され物質代謝する。これが、エコサイクルである。外部・環境にあるものから低いエントロピーを取り入れて、熱平衡から離れた状態を維持しているのである。

このことを、物理学者シュレディンガーは『生命とは何か』の中で「生物は外界から負のエントロピーを取り入れることによって体内で増大するエントロピーを相殺する」と表現した。代謝機能の維持努力は生きていることの本質といえる。

生命という非平衡系は、地球大気という非平衡系の中にあり、地球大気は宇宙空間と太陽という非平衡系の中にあってはじめて存続することができる。

経済活動の生産—消費—廃棄の物理的な意味は、物質の構造・濃度・純度を変化させて、変化過程と結果を利用して、増大したエントロピーを捨てているということである。この場合のエントロピーには熱エントロピーと物エントロピーがある。あらゆる経済活動にエントロピー増大の法則が貫かれている。

いずれにしても、システム内の活動の持続のためには廃熱・廃棄物として、エントロピーを外部に捨てる必要がある。廃棄物のうち土に返して物質代謝に戻せる尿尿などはほとんど還元されていないのが現状であるし、プラスチックなどの土に還せない廃棄物が大量に発生している。

熱エントロピーは宇宙空間に捨てることができるが、重力によって物エントロピーは捨てることができない。

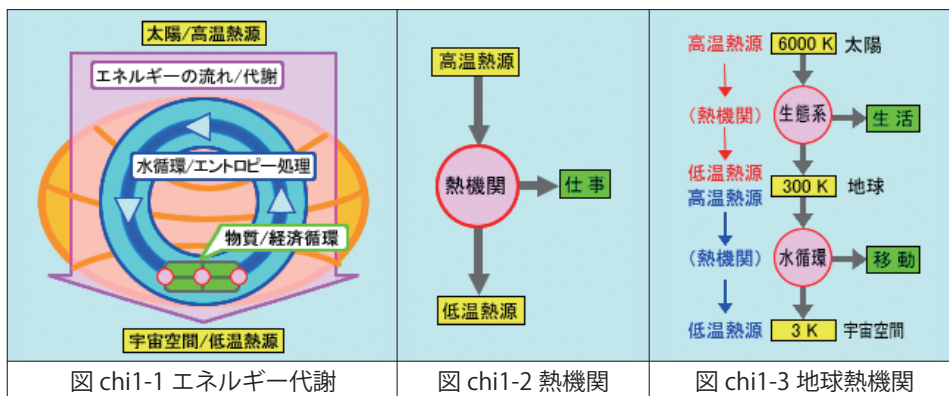


図2-4 地球 = 熱機関



物エントロピーを熱エントロピーに変えることができるのか。

#### 2-4 リサイクルとエントロピー

廃棄物を再資源化して利用することによって、省資源を実現しようというのがリサイクルの考え方である。製品化された物を再資源化し、新たな製品の材料として利用する再循環をはかるものである。

再循環は、①リユース（製品を再使用すること）、②マテリアルリサイクル（再資源化利用）、③サーマルリサイクル（燃料化して熱利用）に分けて考えることができる。

廃棄物を用いて製品（広義の）をつくるには、回収し、分別し、原料として用いる必要があり、そのためにまた大量のエントロピーを発生させる。そのエントロピーを吸収するために水・石油などの低エントロピー資源の消費が必要になる。燃料や電力が必要となるのである。

したがって、必ずしもリサイクルが、トータルに省資源になるかどうかは簡単には判定できない。一般には、資源ゴミのリサイクルによって達成されるエントロピーの減少より、リサイクルによるエントロピーの増大が大きいとリサイクルの意味はない。

ペットボトルのリサイクルには、その過程で数倍のゴミを出す、エントロピーを増大させるという説もある。資源の有効活用だけでリサイクルを評価することはできない。リサイクル過程による環境負荷、エントロピーの増大を考慮しなければならない。

リサイクルにおける環境負荷の小さい生産のシステムをつくること、処分あるいはリサイクルしやすい製品を増やし、難しい製品を規制すること、リサイクルにはエントロピー増大の少ない人力エネルギーをできるだけ使うこと（分別などに）、場合によっては物としてのリサイクルよりも焼却による熱利用・サーマルリサイクル（熱エントロピーは宇宙に捨てることできる）をすることなど、エントロピーの視点からリサイクルを総合的に検討することが求められている。

#### 2-5 エントロピーの視点

万物はみなエントロピーが増大し、利用可能なものから利用不可能なものへと移行する。

環境問題を考えるには、資源・エネルギーと廃棄される不要物を同時に見る、エントロピーの視点が欠かせない。物を混ぜることはたやすいが、分離することが難しいのは、混合がエントロピーを増大させることと対応している。自然界になかった有害物質の拡散による環境汚

染の浄化には、エントロピーの低い資源の投入を必要とする。

炭酸ガスの発生は、人間が低エントロピーのエネルギーを求める有効な方法である炭素化合物と酸素を化合させるところから来ている。大気から炭酸ガスを取り除く方法より、低エントロピーのエネルギーが必要な場合に、炭酸ガスをなるべく発生させないようにすることが有効である。

経済学としては、①廃棄物を外部性として、その内部化をはかる方向、②経済循環をエコサイクル、つまり、生産—消費—分解のサイクルに近づけることを考える必要がある。いずれにしても、生態系から資源・エネルギーを採取して、生態系に物エントロピーと熱エントロピーを排出する経済活動を、資源の採取と生態系への廃棄の両面から、生態系システムの下位システムとしてその許容範囲に抑えることが必要になる。

エントロピーは直接観察できる量ではない。人間活動におけるその収支解析の展開が求められている。大気・水・大地のエネルギー循環、鉱物・植物・動物の生命循環の全てがエントロピーを低減する活動となっており、人間のみが物を資源として高エントロピーを排出しているのであり、あらゆる人間活動においてエントロピーを増やさない工夫が必要であるといえる。

図0-1の地球環境学のフレームワークの真ん中におかれた地球は、図2-1の地球と重ね合わせて、エントロピーの視点を持って検討する必要がある。

#### 補遺3：人口定常化の予想と環境

日本の人口減少は2005年から始まっている。100年後には人口は半減すると予測されている。しかし世界人口は増大を続けているが、この増大する世界人口もやがて定常化すると考えられている。

この人口定常化はどのようなものか。定常化にしても、あまりにも大きな90億人、100億人を地球は養うことができるのか。人口定常化は、定常経済の世界の実現とリンクするのか。さまざまな課題がある。

#### 3-1 世界人口の増加

世界の総人口は、1万年にわたって、1,000万から5億の間を変動し、ごくゆっくりとした増加傾向（年率0.1%以下）であった。17世紀頃その増加率は著しく高まり、20世紀下半期の半ばには爆発的な増加に転じた。1970年代初頭には2%になった。1%を超えたのは、20世紀から21世紀前半にかけての100年である。

1700年の約6億人から2000年の約60億人へとわずか

300年の間に10倍化した。この増加は現在も続いており、2013年には70億人となり、2040年には90億人になると予測されている。いわゆる「人口爆発」である。「人口爆発」の増加率は、年率2%である。

30万年前によく100万人、農耕革命の6000年前で8,700万人であった。有名な「デュランの人口図式」(図3-1)に見るように、人口増加は1750年頃まで緩やかで、ほとんど横ばいともいえる状況であった。

もう少し詳しく見ると、ピラベンの人口研究による紀元前4万年以降の人口変化は、図3-2のようになっている。

人類史において過去3回の大きな人口増加があった。中期旧石器から後期旧石器時代、後期旧石器から新石器時代の農耕革命期、18世紀から19世紀の産業革命期の3回である。このそれぞれの人口増加は、経済発展と食糧供給の増加と結びついている。

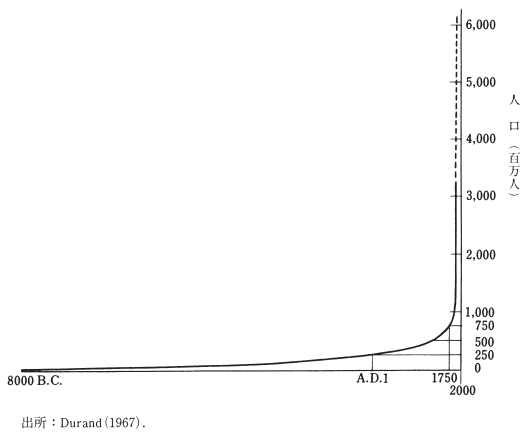


図3-1 デュランの人口図式

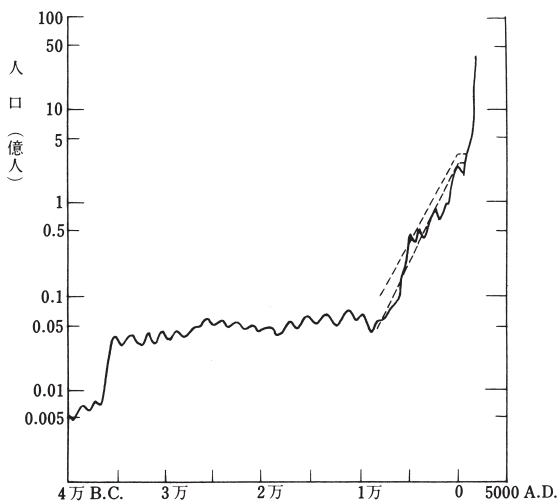


図3-2 ピラベンの紀元前4万年以降の人口

### 3-2 世界人口は定常化するか

現在、70億人を超えている世界人口は、国連の推計によると2050年までに96億人に達するという。長期的な人口推計、環境省作成(紀元前から2010年 図3-3)、デュランの人口図式などで見ると、世界人口は急激に増え続けているように見える。しかし、国連(2015年)の将来予測によって、2100年までのディテールを見ると、人口はなだらかなS字カーブを描いており、増加率が鈍化傾向に入っていることが読み取れる(図3-4)。

人口増加率は、1965年から1970年の年率2%のピーク(2%の増加率であると35年で2倍になるすさまじい増加率)から減少し、2005年から2010年は年率1.2%となっている。10年で0.1ポイントの割合で減少している。特に先進国の人口増加率は21世紀に入り急激に減少している。途上国でも遅れて減少している(図3-5 アンガスマディソン)。

人類史において人口増加率が1%をこえたのは、20世紀から21世紀にかけての100年にも満たないごく短い時期に過ぎなかった。

この図は、コールの研究結果の図3-6と一致している。

世界人口の推移と推計：紀元前～2050年

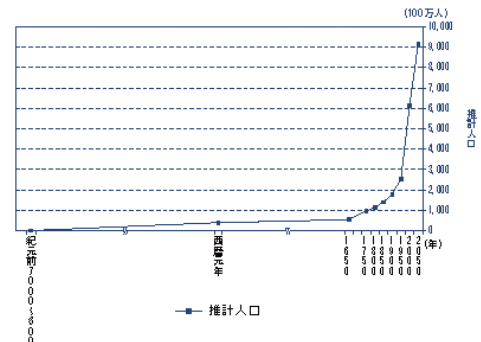


図3-3 2050年までの世界人口(環境省作成)

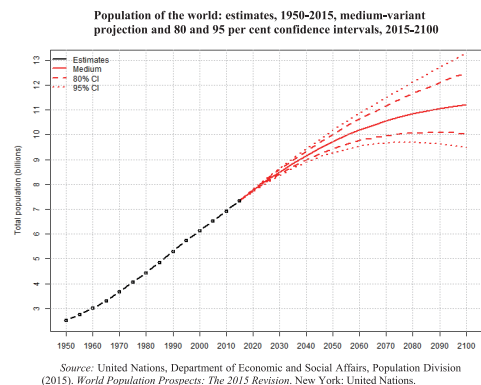
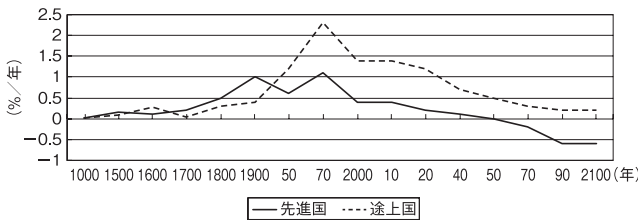
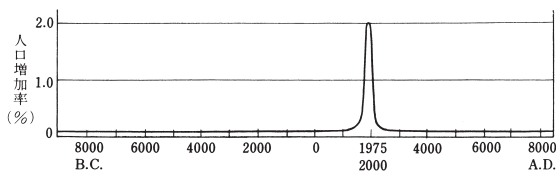


図3-4 2100年までの人口推計(国連)



出典：アンガス・マディソン「世界経済2000年史」(2004年、柏書房)、国連人口中位予測、2050年以降は著者中位想定

図3-5 人口増加率の変化(アンガス・マディソン)



出所：Coale(1974)に、国連資料を基に多少修正を加えた。

図3-6 人口増加率の変化(コール)

この二つの人口増加率の図は、世界人口が定常化に向かうことを示唆している。

国連の中位予測では人口が漸増して2100年頃に109億人に達して減少に転じる、低位予測では2090年頃に人口減少に向かうとされている。

地球環境に大きな負荷をかけている人口増加に関して、21世紀中にピークを迎え、その後減少に向かうと予測されているのである。

### 3-3 何故人口が減少に向かうのか

多産多死から少産少死に至る過程をヨーロッパで18世紀後半から20世紀初期までに経験した、この経過を「人口転換」という。18世紀の産業革命からの近代的経済発展・都市化・工業化の過程で死亡率と出生率が異なるタイミングで低下する。多産多死、多産中死、中産中死、少産少死の段階を経るといふ帰納的人口理論であり、人口学におけるグランド・セオリーといわれる。

このグランド・セオリーの他にも、①合理的選択—子供を持つコストベネフィット原理(子供を持つことの利益と子供を育てるコストの比較)、②相対的所得仮説—子供時代の経済状況と将来の生活見通しの比較、③リスク回避—将来の不透明さが産み控えを起す、④ジェンダー間不公平などが、出生力低下の理由とされる。

現在の日本の少子化も上述のさまざまな理由から説明されている。なお、人口減少社会は、憂うべきものか、好ましいものかについてはさまざまな議論がある。簡単にいうと人口が多ければGDPは大きくなるが、単なる規模の問題で必ずしも豊かさとは関係がないという説や、過去の人口増加と一人あたりGDPの上昇が正の相

関関係にあるという説もある。いずれにしろ、人口減少のトレンドを変えることはできない。むしろ、人口5,000~6,000万人の成熟したヨーロッパの先進国をモデルとすべきだと思うが、ここではこれ以上は問題としない。

### 3-4 地球は90億人を養えるか

現在の食糧生産を2040年の予想人口90億人で割っても、一人あたりの食料は2,500キロカロリーから3,000キロカロリーになるといわれる。これは、十分な食料の供給水準といえることができる。

ところが、70億人の人口のうち、10億人は飢えている。栄養不足人口の多くは少数の貧困国に集中している。餓死は、干ばつや紛争によって引き起こされるだけでなく、慢性的な飢餓によっている。この「静かな飢餓」が起こる要因の一つはマルサスの「人口の罠」である。資源の生産力以上に人口が増えた時、生存に必要な栄養状態・衛生状態が確保されなくなり、一部の人口が都市に流入し貧困層を形成するという、多くの貧困国・途上国で起こっている問題である。

もう一つは、途上国が抱える巨額債務の問題である。債務返済のための商品作物栽培のモノカルチャー化が進行し食糧自給ができなくなっている。

一方、「豊かな国」では、肥満という栄養不良が社会問題になっている。輸入される食料も多く、フードマイレージの長い食料が消費され、また、廃棄される食料も多い。日本の廃棄食料で多くの飢餓人口を救えることは明らかである。このように「食糧問題」は南北問題なのである。

また、重要なのは、「水問題」と砂漠化の進行が食糧供給を大きく制約する可能性が高い。陸上降水は年間50兆トン、このうち5兆トンを利用していると見られる。農業、工業、生活用水の割合は、7:2:1ぐらいである。現在の農業を支える水資源はすでに過剰使用の状態にあるといわれる。湖水・地下水の過剰使用も問題になっている。

砂漠というのは、年間降水量が250mm以下、または蒸発量が降水量より大きく植生の乏しい地域と定義されている。砂漠面積は36億ヘクタールと陸地のほぼ4分の1を占めている。この砂漠の周辺地域で、降水量の減少や過度の伐採・農耕・放牧がおこり、年間600万ヘクタールも砂漠化が進行している。

90億人、100億人の世界人口を養うことは潜在力としては可能だといえる。しかし、そのためには、「食糧の偏在と貧困の問題」と「砂漠化問題」という大きな課題に取り組む必要がある。

3-5 ハーマン・カーンの『大転換期』(1979年)

ハーマン・カーンは、1979年に『大転換期：産業革命からの二百年・これからの二百年』を世に出して、「19から20世紀の工業化の時代は終わり、21世紀は脱工業化の時代に入る転換期を迎える」とした。1972年の『成長の限界』から7年後のことである。「1970年に世界経済の成長はピークに達し、以降の世界は病める時代に突入した。その意味で1970年は大転換期だった」というのだ。

世界人口が100億人のピークを迎えた後に横ばいとなり定常化すると、ハーマン・カーンも考えた。彼は人口定常化の予測にコールの図3-6を用いている。人口増加率1%より高い部分の90%がちょうど急激な転換の半世紀に当たっているという。「人類の急激な指数関数的成長は人類の悲劇であり、破滅的な衝突」だとする。

転換期を経て、21世紀は「脱工業化社会」「脱経済社会」へ向かうと分析する。2200年には、脱工業化社会への移行がほぼ完了するという。そして、指数関数的成長に対して、S字型曲線・ロジスティック曲線に基づく成長を予測する。図3-7に示す幾何級数的成長に対して、下欄の上限値で定常化する未来像を提起する。

ただし、この成長が抑制され定常化に至る理由は、新マルサス主義(カーン等が『成長の限界』論者と呼ぶ、資源の有限・地球の有限によって成長が抑制されるあるいは抑制すべきであるという論者)とは異なるというのだ。

もともと自然な成長は幾何級数的ではあり得ない、ロジスティック型つまりS字型であるという。無理に何かをストップする必要がない「ひとりでに」減速が実現するであろうという楽観論である。文化的、社会的要因が

	世界人口(十億)	世界総生産(兆ドル)	1人当り生産(千ドル)
1975	4.0	7.5	1.9
2000	6.5	25	4
2025	11	85	8
2050	18	290	16
2010	48	3,400	70
2200	340	500,000	1,500
ハドソン研究所が予測している上限	10	200	20

(人口=年率2%, 総生産=年率5%)  
(1978年のドル価による)

図3-7 指数関数的成長(上段)とS字型成長(下段)

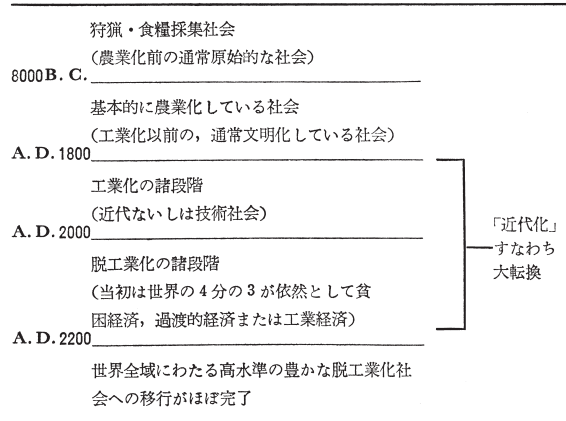


図3-8 ハーマン・カーンの経済発展段階史

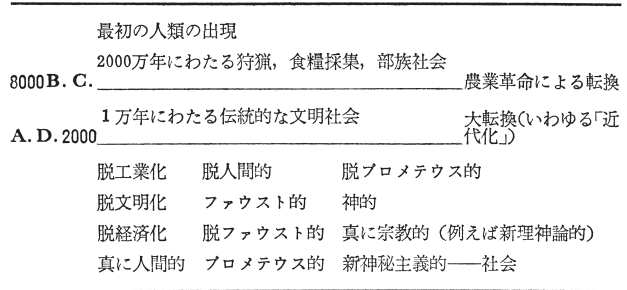


図3-9 ハーマン・カーンの社会発展

成長に効果的に干渉するというのだ。

そして、工業化以後の社会を図3-8、図3-9のように検討する。脱工業化、脱経済化を経た「真に人間的な社会」への発展を、未来予測・「ノーマティブ法」の「あるべき姿」と見ることもできる。たいへん興味深い検討であるが、ここでは図の提示に止めておく。

3-6 人口定常化と地球環境

人口定常化の予測は、確からしいといってもよい。21世紀中の世界人口は最大化し、その終わり頃には100億人水準で定常化すると見られる。このことは、地球の環境負荷の増大にとってどういう意味を持つだろうか。

環境負荷が、大まかには人間の社会経済活動の量に比例すると仮定すると、次のようなことが予想される。

- ① 人口増加に伴う環境負荷の大幅な増大の心配がなくなる。
- ② 人口が定常であっても一人あたりの活動が増大し、負荷は増大を続ける。
- ③ 人口の定常化は先進国から起り途上国で遅れて起こる。この間の途上国での一人あたりの活動の増大と人口の漸増は大きな負荷となる。

人口が定常化するといっても、環境問題が解決するわ

けでも、なくなるわけでもない。定常化の予想は今世紀末かそれ以降になると予想されている。

環境問題は現在も進行しているが、さまざまな取り組みもまた進んでいる。すでに我々が行き過ぎているという警告も多い。しかし、ハーマン・カーンは、環境問題にはほとんど関心を払わない。

資源・エネルギー制約ではなく、文化的・社会的要因が自然に成長を抑制し、人口定常化時代の社会経済（図3-7の予想上限値）に到達すると考える。この考え方は、楽観的に過ぎるが、一種の「定常型経済」と考えることができる。

J・S・ミルの定常状態も、ハーマン・デイリーの持続可能な発展の経済も生態系の下位システムとしての経済の意図的な停止状態の創出、あるいは定常経済システムの構築を求める。

問題は、①人口定常化が持続可能な発展の経済・定常経済構築の有効なフレームとなり得るのか、②人口定常化と定常経済はシンクロするのか、そのタイミングはどうなるのかといった人口定常化と定常経済はマッチするのかということである。

とりあえずは、人口減少社会において、人口停滞の中から大量生産・大量消費・大量廃棄のライフスタイルを超越する、文明システムの新たな成熟を模索することが求められる。

人口減少社会は、大きな趨勢としての人口減少を小手先の政策的対応で糊塗すればよいというものではない。積極的に持続可能な社会の追究の機会とすべきである。先進国における人口減少社会の持続可能な発展の追求が、やがて成長と人口減少の段階を迎える途上国のモデルとして伝搬普及する図式は、簡単ではないが検討に充分値すると思われる。

#### 補遺4：100年後の世界

##### —地球環境世紀はどう展開するのか

21世紀を地球環境問題解決への転換点、環境世紀とすることができるのかということ、環境の専門分野からの予測ではなく、より一般的な未来予測を通して考えておきたい。

そのために、ここでイグナシオ・パラシオス＝ウエルタ編『経済学者、未来を語る』を取り上げる。この本は、「100年後の世界はどうなっているのだろう」という疑問にとりつかれた編者が、できるだけ分野が重ならないように選定したノーベル賞受賞者、元全米経済学会会長などを含むアメリカのトップ経済学者10人の参加を得て、現時点から100年先までの世の中の変化と課題につ

いてとりまとめたものである。

英国の経済学者、ジョン・メイナード・ケインズ（1883-1946）が、世界大恐慌後の1930年に発表した「我が孫たちの経済的可能性」というエッセイのひそみに倣っている。ケインズは、100年後の世界の生活水準が4倍から8倍程度に向上するという当たった予測、週15時間まで労働時間が短縮されるというはずれた予測など興味深い数々の予測をし、「生きるために戦う段階から生きるために学ぶ（余暇の増大によって）段階」へと進歩するとした。

10人の各分野のトップ経済学者たちが、21世紀、これからの100年をどう描いているのか。10編の論考は、シミュレーション的予測でもなく、SF的な予測でもない。それぞれの経済学者・エコノミストとしての深い洞察に基づいた個性あふれる予測を展開している。その中から地球環境問題の100年後を探ってみたい。

(1) 「孫たちが受け継ぐ世界」：ダロン・アセモグル（Daron Acemoglu）（MIT教授、経済史・経済成長理論）  
動向分析と予測を、10の柱、①権利革命、②テクノロジーの進歩、③たゆみない成長、④不均等な成長、⑤就労形態と賃金の変化、⑥健康革命、⑦国境に影響を受けないテクノロジー、⑧平和の世紀・戦争の世紀、⑨政治における反啓蒙主義、⑩人口の爆発的増加・資源・環境から詳細に行っている。

〈権利革命・テクノロジーの進歩・健康革命は進み、経済成長のプロセスが終わりに近づいているとは考えられない。政治における反啓蒙主義運動・宗教の関与、文明の衝突が懸念される。人口はこれからもしばらく増加、100年間のどこかで停滞する。人口とともに所得も増えていくと、環境に対する負荷が増加し地球の能力ではそれを支えることができないのではと危惧する。〉

〈地球の生き残りの保証のためには、テクノロジーに関して、クリーンなエネルギーへの移行が求められ、クリーンエネルギーのコストが化石燃料の1.5倍のレベルになれば代替エネルギーへの転換は始まる。政治に関しては、クリーンなエネルギーへの移行に関して各国が協調する国際協定が必要で、これも権利革命の進展がよい方向へ後押しするだろう。〉

(2) 「暗闇を抜けて明るい未来へ」：アンガス・ディートン（Angus Deaton）（元全米経済学会会長、需要の理論と実証）

「雨・晴れ両模様の空だ。」という。

〈ケインズの頃の厳しい時代には、戦争もなく人口も

増加しないとき進歩は続くと予測された。今日も時代は厳しいが、人口増加はケインズの時代ほどの脅威ではない。情報ベースの技術進歩は生産性の向上には貢献するが、幸せに対してはどうか。格差の異常なまでの拡大、金融危機は深刻になり、平均寿命の伸びも勢いを失っている。抑制のきかない気候変動が立ちはだかる。)

しかし、著者は「未来に対して慎重な楽観主義の立場をとる」とし、成長に関しては、モノよりもサービスの時代へ、貧しい国のキャッチアップによる成長をみる。明るい側面として、健康は今後も改善、民主主義の普及、教育水準の上昇などをあげる。「おそらく世界規模で見た場合最も不確実なのは、気候変動への対応である。何らかの国際協定が成立すると考えるのは難しい。深刻な被害や破壊を実際に経験しなければ、人々は力を合わせて変化に取り組む気持ちになれないようだ。しかし危険が間近に迫ると人々は団結し、進歩に向けて大きな力が発揮される。私はそちらの可能性の方にかけてみたい。」

(3) 「21世紀型経済ハリケーンの不確実性コーン」：アビナッシュ・K・デキシット (Avinash K. Dixit) (元エコノメトリックソサエティ会長、元アメリカ経済学会会長)

〈ハリケーンの予想進路は「不確実性コーン」によって示されるが、経済の場合も同様だとして、その予測をハリケーンになぞらえる。

中心線として、①経済・金融の何度かの危機、②国際的な公共財(環境)に関する国際的な協調(特に気候変動のリスクの予防措置)の難しさ、③エネルギー源は化石燃料中心で温室効果ガスの発生は消滅しない、原子炉の事故は繰り返すこと、などを予測する。

右の側線として、アメリカとヨーロッパは政策が機能しないと二流国におちいり、欧米諸国は借金漬けの体質から抜け出せず、インフレ・通貨危機に定期的に見舞われることなどを予測する。

左の測線として、中国とインドが世界の頂点に至ることが確実視されているが、不平等と内戦に対する警察・軍隊への支出が増大すると予測する。)

〈こうした悪夢を少なくするために、危機は回避できないという現実を政策立案者が把握し、よい時代の中に最も重要な対策を予め準備しておくことが求められる。)

そして、貧しい世界が先進国に追いつき、豊かな世界が経済的福祉の現状を維持しているような未来を「夢のシナリオ」だとして、デキシットは次のようにいう。

「格差が社会の基本的な結束を脅かしてはならない。国民の気持ちが基本的な部分で統一され、アメリカ人あ

るいはインド人として信念や感情を共有すれば、最終的には我々は皆人類で地球という惑星の市民だという思いにつながる。」

「その結果、他人への思いやりが十分に育まれる。しかし、自分を大切に考える気持ちが強い、悪評高いホモ・エコノミックスとしての精神も十分に残している。」とする。

(4) 「富と自己防衛型社会」：エドワード・L・グレイザー (Edward L. Glaeser) (エコノメトリックソサエティ・世界銀行のフェロー、都市経済学)

〈100年後は、はるかに豊かになっていると楽観している。特に最下層で大幅な改善が見られる。)

〈しかし、今より高潔な世界が到来するとは思えない。裕福になっても、7つの大罪－貪欲・ねたみ・怠惰・貪食・色欲・高慢・憤怒が改善される見込みはない。)

〈ケインズにとって、執筆時大恐慌の大きな経済的コストや世界大戦の勃発など予想すらできなかった。ましてや、大国同士の衝突の可能性、ならず者国家やテロリストが危機を招く機会の拡大、気候変動との関連性が疑われる自然災害や伝染病による大きな損害の恐れなどが、1930年代よりもさらに深刻なダメージをもたらすかも知れない。)

〈未来の繁栄を妨げるかも知れないさまざまな脅威、危険なテクノロジーの利用、気候変動、飢饉、エネルギー不足による悲惨な結末は、自然保護や代替エネルギーによって食い止められる。天然資源の不足にはイノベーションが役立つ。それよりも、繁栄すればするほど現状に満足するようになり、リスクを伴う変化をためらう。守るための費用をふやしたくなる「自己防衛型経済」を危惧しなければならない。)

グレイザーは、ケインズと同じ楽観論の立場をとるといふ。

〈孫の時代には今よりはるかに豊かになる。ケインズと異なり労働時間が短縮されるとは思わない。人間の道徳性変化の実現の見通しは小さい。地球全体は以前より平等な場所に、豊かな世界では逆に不平等が進んだ。極端な平等主義的な政策が経済の持続的成長を妨げるリスクも否定できない。暴動・伝染病・天災・天然資源の不足の影響は小さい。)

(5) 「ケインズ、彼の孫と我々の孫」：アンドリュウ・マスコレル (Andreu Mas-Colell) (スペイン、ポンペウファブラ大学教授)

〈ケインズにとって、大きな課題は生活水準・貧富の

問題であった。人口増加の抑制・科学の進歩・戦争の回避の三つの条件が満たされれば、成長は実現すると予測した。100年後、①自然な成長と意図的な行動によって世界から貧困は根絶、②平均寿命は延びて健康状態を改善、③先進国はさらに豊かに。

〈新たな課題は環境である。天然資源の枯渇が成長を抑制するかもしれない。地球は無限の存在ではないことが認識されるようになった。これは天然資源が単純な懸案ではなく「存在にかかわる問題」なのである。①21世紀はエネルギー高だが、法外には高くない可能性もある、②環境を一つのコンセプトとしてとらえるのではなく、多面性を認めた上で検討すべき、様々な局所的環境への取り組みと地球全体の問題として大気・海への影響を考えるべきである。〉

市場や規制によって正しい利用価格が帰属計算されれば環境保全のために費やされる資源は増える。ただし、気候変動におけるグローバルガバナンスの失敗は深刻なレベルに達している。〉

〈ケインズが主張するように、「経済問題は人類にとって恒久的な問題」ではなくなるのか。ケインズの予測が正しいと考える。経済問題は完全には消滅しないが、多くの問題の一つとなるだろう。〉

(6) 「21世紀のアメリカ政治とグローバルな進歩」：ジョン・E・ローマー (John E. Roemer) (エコノメトリックソサエティフェロー、数理経済学、アナリティカル・マルクシズム提唱者)

最も重要なのは経済ではなく政治であるとして「世界で率先して取り組むべきは、温室効果ガスの排出とそれが地球の気温や気候に及ぼす影響だと私は確信している。」という。

〈大統領も議会も率先した行動をとってこなかった。気候変動を抑制するための努力が欠かせない状況にもかかわらず、世界は前進を大きく妨げられている。アメリカが積極的に取り組めば中国も見倣う。〉

〈経済の視点から見れば、気候変動は生活水準を大きく低下させずに解決できるもので、経済成長も可能だ。化石燃料への課税が一気に増えることで深刻な影響を受ける人たちには、政府の介入、税制優遇、補助金給付、再分配などの措置が必要。共和党は大企業、石油産業界との結びつきが強く、また市場への介入に反対の立場。国のインフラ、特に教育投資への無関心も問題である。〉

〈この100年間の最大の漸進的発達、先進国の社会福祉制度の発達であり、大恐慌と第二次世界大戦がこの発展の大きな契機となった。〉

〈世界の成長が収束に向かうという予測。中国の経済成長・独裁制が何十年も続くことはない。ブラジル・インドは民主主義への移行をうまく管理している。〉

「気候変動にうまく対処するためには先進国での所得成長率を、今後100年間、年間1%程度までに抑えなければならない。」

〈大気中の炭素濃度を450ppm以下に維持できるレベルを目標に、今後100年間で温室効果ガスの排出量を削減するためには、アメリカ・中国が自らの排出量を大幅に減らす必要がある。〉

〈排出量抑制のための国際交渉が合意に達する条件：無理な成長路線をとらず、気候変動の問題を起さず、アメリカと中国の一人あたりの所得が収束することであり、具体的には、北の一人あたり実質厚生成長率を1%で推移し続けることが条件となる。南の成長を北より遅らせず、北の実質厚生成長率1%の上限を設ける形で協定をまとめることである。〉

〈しかし、気候変動の課題に取り組む最適経路が実行可能になるような政界再編が実現するとは想像しがたい。課題に対応するためにはおそらく経済危機しかない。あるいは、ヒスパニック系・共和党中道路線が増加するという人口構成の変化しかない。〉

(7) 「100年後には」：アルヴィン・E・ロス (Alvin E. Roth) (スタンフォード大学教授、ノーベル賞、マッチング理論)

マッチング市場 (需給の均衡が価格だけでは達成されない市場、出願や選別のプロセスなど一種の求愛行動を含む市場のことで、学校、結婚、就職、家族、医療などの市場) の専門家として未来を予測している。

100年間にコモディティ化 (汎用品化) するのはどのような側面か、購入したい欲求と代価を支払う余裕があれば誰でも獲得できるものは何か、将来もマッチング市場で配分が決定されるものは何かという点から、医療テクノロジー、能力向上ドラッグ、大学教育、生殖技術などの未来を予測している。

「未来の最も顕著な傾向は、環境破壊・テロリズム・戦争などに妨害されなければ、世界経済は成長を継続して結束を強める。」という。

(8) 「つぎの世紀のリスクとマネジメント」：ロバート・J・シラー (Robert J. Shiller) (イェール大学教授、ノーベル賞、金融理論・行動経済学)

これからの100年、様々な種類のリスクが存在しているだろうと予測する。

「かつてなかったほどの大勢の人たちが、資源のきわめて限られた惑星でよい暮らしをしたいと願う。大量破壊を目的とした戦略兵器の威力が増し、新しい情報技術の発展は労働市場を混乱させ、キャリアはリスクにさらされる。」

〈人工知能がほぼ完成に近づいた新しい世界でのリスクマネジメントを、ビッグデータはリスク阻止のための大きな機会となる、個人識別の方法は大きく改善される、今よりもさらに複雑な金融契約を作成する能力を持てる、世界政府は存在しないが国際金融機関は強化される、戦争やテロ行為の予防、不平等拡大のリスク管理、そして、地球温暖化など環境リスクの適切な保険・ヘッジで管理する。〉

「リスク管理、金融、保険の進歩で個人的なゴールは達成しやすくなる。」とする。

(9) 「つれづれなるままに未来を語る」：ロバート・M・ソロー (Robert M. Solow) (MIT 名誉教授、ノーベル賞、経済成長理論)

〈過去100年を想像するのは難しい、1910年の実質国民所得は2010年の19.2%程度、1910年の平均8,300ドルというのはなかなか把握できない。つぎの100年を想像するのはさらに難しい。現在の6万ドル強の所得が4倍になり、現在の「中間層」が上位に到達するのは少しもおかしくない。ただし消費の中心が有形財からサービスへ移行する。〉

アメリカ・日本・韓国人の労働時間はヨーロッパに比べて長い。ヨーロッパ人はモノへの執着が少なく余暇への関心が高い。今後余暇が増えていけば実物資本のストックは減少し、総投資も減少し、GDPに占める消費のシェアが拡大する可能性がある。〉

〈地球温暖化が経済成長に及ぼす影響は僅かな範囲に限定されるかも知れないが、深刻度を増す可能性もある。環境が及ぼす深刻な影響は、大気・水、土地利用や都市の居住性、経済生活にも変化をもたらす。〉

再生不能な資源を使い続ければ枯渇するか価格上昇によって成長見通しは様変わりするだろう。資源が足りなくなれば、ほとんどのサービスで物的資本や資源関連製品を人的資源で代替することになる。庭づくりなどが余暇の中心になれば、投入産出表は変化し、少ない資源や環境の廃棄物処理能力に生産が及ぼす負荷が減少する。

成長の加速によって水などの天然資源の供給が脅かされる可能性がある。何よりも、人口増加のペースを遅らせ、できれば静止状態に到達しなければならない。〉

(10) 「地球の気候を変える」：マーティン・L・ワイツマン (Martin L. Weitzman) (ハーバード大学教授、比較経済体制論、気候変動)

「現代と100年後の溝をうめるために本当に相応しい橋があるとすれば、それは気候変動ではないだろうか。今はこの橋の土台しか思い描くことができない。その土台はガラス越しにぼんやりとしか見えない。」

〈将来、大量の非炭素エネルギーを低価格で発生できるようにならない限り、炭素排出の大量削減をめざして拘束力のある国際協定が誕生する可能性はきわめて低い。逆に、気候変動の影響を受けている一部の中進国は大きな誘惑に駆られ自分の国や地球全体の気温上昇を抑えるために気候改変技術を一方的に使おうと考え、ジオエンジニアリング (気候工学) の一つである成層圏にエアロゾルを注入する太陽放射管理を実践するかも知れない。〉

〈現在は地質年代としてアントロポセン「人世紀」と呼ぶのが相応しい。人間が大きな影響力を発揮する時代、70億の人間のバイオマスの量 (生物資源) は他の大型生物をしのぎ、ホモサピエンスのような形での支配者は他になく、その力は氷河時代の自然の猛威にも匹敵する。〉

現在のCO<sub>2</sub>レベルは80万年の中の最高レベルよりさらに40%高いレベルで、これから100年間同じレベルで排出すれば、過去1000万年間の最高レベルよりもさらに2倍から3倍のレベルになる。地球的規模の気候変動がもはや避けられない可能性が高い。〉

〈CO<sub>2</sub>排出の影響は現れるまでに時間がかかり、何世紀から何千年も継続する。これは地質学的基準からは未曾有のスピードであるが、人間の一生から見れば、気が遠くなるほどゆっくりで、どんな結果も自分たちとあたかも無関係のように見える。温室効果ガスの蓄積されたときの悪影響に関して自然の境界線は存在しない。〉

〈気候変動の構造的ないくつもの不確実性、現在と同じ割合で100年も放出し続ければ、地質学の上でも人類史の上でも従来の経験をはるかに超えた危機的状況に立たされてしまう。破滅的な気候変動のきっかけになるほど「十分に高い濃度の温室効果ガス」とはどの程度なのか。その結果、どんなプロセスが解き放たれるかわからない。〉

「私の結論、悪い結果を回避するために有効な行動がタイムリーに実行される見込みはなさそうだと悲観している。」「人間と自然の間の大きな緊張状態は長い時間をかけて生まれ、アントロポセンと呼ばれる21世紀の初めに恐ろしい姿をようやく現した。その威力はさらに大きく広がり、22世紀の初めにはとてつもない規模にふくれあがっているだろう。その頃には人間が自然を保存する



という幻想はもはや消滅しているはずだ。本当に大切なのは、人為的な操作に永久に姿を変えてしまった自然とともに人類がいかに進化していくのか。」として、自然との共進化を描いている。

それぞれの論者の予測は、その専門分野も方法もみな個性的である。100年後に関しての議論は、全体的には「慎重な楽観主義」といってよい。

100年後、どの論者の予測が当たっているのか、外れているのかそれはわからない。その結果よりも、我々はそれらの示唆するところを学び、各論の中からこれからの取るべき方向を探索しなければならない。

技術進歩、民主化・権利革命、健康革命は総じて進行し、人口の定常化が予想され、大国の衝突・テロリズムの危険(これはまた現在人類の直面する大課題であるが)などがなければ経済成長と生活水準の向上は続くと思われる。南北の格差、所得格差の解決については、成長ほどの確信を持っては語られていない。

そして、ケインズの時代と明らかに異なっているのは、気候変動リスクの問題である。その論調に違いはあるものの、論者の多くが共通して課題として指摘している。気候変動の不確実性に対する受け止め方の差異はあるが、楽観的な解決を提起するものは誰もいない。

温暖化ガス排出を抑制する国際的な協調の実現に関しては多くは悲観的である。協定成立のためには「南の成長を北より遅らせず、北の実質厚生成長率1%の上限を設ける形でまとめること」が必要だとする具体的な見解もある。

危機・破壊を目前にし、経験しないと対応できないのかもしれないとの悲観的な見方が強いように見える。

気候変動に関して、このままで推移すると世紀末には4℃の気温上昇が予測されるが、これを2℃未満に抑えるという「2℃目標」は、2009年イタリア・ラクイアG8サミット的首脳宣言、2010年COP15の「カンクン合意」で、国際交渉合意となった。

2℃目標は、炭素換算で1兆トンの枠内にとどめることに相当し、すでにその半分の5千億トンを出してしまっているから、5千億トンの排出枠を残すばかりである。5千億トンという大きいように見えるが、現在の排出量を続けると40年でこの枠は使い切ってしまう。エネルギーの根本的な変革を行う大幅な排出削減が求められ、今世紀中に排出ゼロにしなければならないという。

IPCC 第5次報告は、これが未だ可能で間に合わせることができるが、大変に困難だとしているのである。国際交渉合意として採択された「カンクン合意」の2℃目

標の実質化は、COP18に持ち越されている。ただ、中国のCOPへの参加意向表明などの明るい面もある。

5千億トンの排出枠は、資源と同じように、「納得・合意」を得られるように配分可能な「逆資源」と考えることができる明快な枠組みではある。2℃目標の達成は、化石燃料エネルギーの自然エネルギーへの大幅な転換だけでは実現できないかもしれない。

炭素貯留技術CCSやバイオエネルギーと組み合わせた炭素貯留(バイオCCS)、成層圏へのエアロゾル注入による日傘効果技術などの「ジオエンジニアリング」が必要になるかもしれない。このジオエンジニアリングはまたこれで議論の余地の多い課題である。エネルギー技術・気候工学などのテクノロジーと環境問題についてのレビューは別の機会に譲る。

21世紀は環境革命の世紀だというのは、人類史にとって農耕革命、産業革命と同等あるいはそれ以上の重要性を持つ大転換期だということである。

地質年代の「人世紀・アントロポセン」における、人類が変えてしまった自然との新たな「共進化」の問題として、気候変動の問題を捉え直すというワイツマンの指摘は、100年後の世界を超えていく視点を与えてくれるのかもしれない。

#### 〈追記〉

2015年12月12日、パリで開かれていたCOP21は、「京都議定書」以来18年ぶりに温室効果ガス削減の新たな枠組として「パリ協定」を採択した。京都議定書に替わり、2020年以降の温室効果ガス排出削減に関して法的拘束力を持つもので、産業革命前に比べて1.5℃以内の気温上昇に抑えるという2℃目標より高い「1.5℃目標」とし、世界全体の温室効果ガス排出をできるだけ早く減少に転じさせるとしたものである。

二大排出国である中国とアメリカが参加し、発展途上国も含めた全ての国が参加する枠組となったことに大きな意義がある。ただ、目標達成の義務化・罰則規定は盛り込まれず、各国が国連に削減目標を提出し5年ごとに行う検証によって実効性を担保していくとしている。大きな課題である先進国の途上国支援の問題は、協定本体には盛り込まれなかった。

「1.5℃目標」と全ての国が国際的に結束して取り組む体制へと踏み出したことは、画期的な前進である。このような歴史的な合意に至った背景には、島嶼国など途上国での被害の深刻化、中国の大気汚染などの環境問題の激化、各地域での異常気象など、気候変動被害の顕在化が目に見えるようになってきているという温暖化問題の

深刻化があることは間違いない。

「パリ協定」によって、途上国と先進国が歩み寄ることのできた意義は大きく、国際的な結束のスタートラインとなるのか、注目していかなければならない。

#### 謝辞

本稿は、公立鳥取環境大学在任中の環境問題についての、専門の研究分野の延長上での、私の学習・思索・講述から生まれた一種の論説である。

これをまとめることができたのは、「環境学概論」の講義の機会を与えていただいたおかげであり、また教職員の皆さんとの討議や交流があったことであり、学生諸君の熱心な聴講を得たおかげであります。深甚な謝意を表したいと思います。

また、この場をお借りして、これまでの皆様のご厚誼とご厚情に感謝いたします。

#### 《参考文献・図表出典》

- 1) 東樋口護(2015)『地球環境学入門』,丸善出版, p.108.  
(図0-1)
- 2) 酒井治孝(2007)『地球学入門』,東海大学出版会, pp.219-220. (図1-1, 図1-2)
- 3) 井上雅夫(2011)『温暖化ツイッター小説第11集』.  
[http://www.venus.dti.ne.jp/~inoue-m/on\\_co2\\_4.htm](http://www.venus.dti.ne.jp/~inoue-m/on_co2_4.htm)  
(図1-3 : <http://j.mp/iaIdBh>, 図1-4 : <http://j.mp/hlseut>, 図1-5 : <http://j.mp/cqt5Y3>)
- 4) 総合科学技術会議(編)『地球温暖化研究の最前線』,  
「第2章 気候モデルと温暖化の予測」, p.55. (図1-6 [http://www8.cao.go.jp/cstp/project/en-vpt/pub/GW\\_report/02\\_02\\_50.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/project/en-vpt/pub/GW_report/02_02_50.pdf))
- 5) 植田敦(2008)『CO<sub>2</sub>温暖化説は間違っている』, ほたる出版.  
(図1-7 : p.163, 図1-8 : p.41, 図2-2 : p.141, 図2-3 : p.67)
- 6) 光延昂毅(2004)『電脳経済学』,「地球熱機関」.  
(図2-4 <http://www.mitsunobu.server-shared.com/f-term/chil.html>)
- 7) 河野稠果(1998)『世界の人口』, 東京大学出版会.  
(図3-1 : p.5, 図3-2 : p.6, 図3-6 : p.36)
- 8) 環境省(2010)『平成22年版 図で見る環境白書 循環型社会白書/生物多様性白書』,  
(図3-3 [https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h22/img/zu\\_21\\_001.gif](https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h22/img/zu_21_001.gif))
- 9) United Nations(2015)“World Population Prospects The 2015 Revision – Key Findings and Advance Tables”, p.2.  
(図3-4 <http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/>)
- 10) 松久寛・中西香(2014)『衰退する現代社会の危機』,  
日刊工業新聞社, p.3. (図3-5)
- 11) ハーマン・カーン(著)・風間禎三郎(訳)(1980)『大転換期』, ティビーエス・ブリタニカ, (図3-7 : p.97, 図3-8, 図3-9 : p.33)
- 12) 河野稠果(2014)『人口学への招待』, 中公新書.
- 13) イグナシオ・パラシオス = ウエルタ(編)・小坂恵理(訳)(2015)『経済学者、未来を語る』, NTT 出版.
- 14) IPPC 第5次報告書『政策決定者向けの要約』, 環境省.  
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/> 他
- 15) 室田武(1995)『地球環境の経済学』, 実務教育出版.
- 16) 杉本大一郎(1992)『エントロピー入門』, 中公新書.

※ URL 及び閲覧日は、全て2015年9月1日現在  
(2015年10月13日)