

3.1 地球システムの変容

安成 哲三 (総合地球環境学研究所所長)

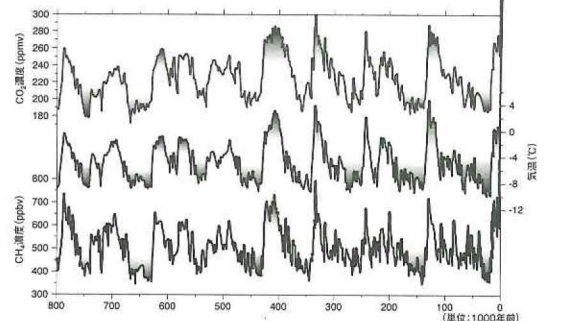
大気圏・水圏・地圏・生命圏からなる地球表層は、ひとつのシステムとして構成されている。このシステムをここでは地球システムと呼ぶ。地球システムは、エネルギーの流れ、水や物質の循環、生態系など、多くの要素が複雑にからみあった動的平衡系として長い時間をかけて進化し、維持されてきた。私たち人類は、生命圏の一員として出現してきたが、人類はこの地球システムを利用しつつ、現在の人類文明を築いてきたといえる。地球環境ということばは、人類の生存に密接に関係した地球システムの状態として使われている。したがって、地球システムには、人間活動も当然その要素の一部として入っていると理解すべきである。本稿では、地球システムの変化でも特に、人類が出現し、地球システム内のそれぞれの圏と相互作用を開始した地質時代として定義された新生代第四紀における変化を対象に議論したい。

■ 第四紀における地球システムの変化 ——氷期サイクルの卓越

地球の気候は約6500万年前からの第三紀以降、全球的に寒冷化し、約260万年前に始まった第四紀に入ると寒冷化はさらに加速した。第三紀から第四紀の寒冷化についてはいくつかの議論があるが、パナマ地峡の出現に伴う海流系変化やヒマラヤなどの大規模山岳の隆起に伴う風化により、大気中のCO₂濃度が低下したことなどが要因として考えられている。全般的な寒冷化とともに、気候の数万年から10万年周期の変動幅も大きくなっている。

過去約100万年間は、現在に至るまで、地球システムは中高緯度の大部分が氷床・氷河に覆われた寒冷な気候の時期(氷期)と、氷床・氷河が大きく後退し温暖な気候の時期(間氷期)が、数万年から10万~12万年の周期で繰り返し、氷河時代(Ice Age)とよばれている。南極氷床コアの解析からわかった過去80万年間の地球システム要素の変動を、図1に示す。約10万年周期の氷期

図1 南極氷床ドームCコアの解析から推定された過去約80万年の地球大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度変動(上)、気温変動(中)とメタン(CH₄)濃度変動(下)
右上の矢印は、現在(2009年)のCO₂とCH₄濃度を示す



出典: http://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/research/past_atmos/composition_greenhouse/

間氷期サイクルは間氷期から氷期へはゆっくりとした寒冷化を示す一方、氷期の最盛期から間氷期への戻りは非常に急激で、1万年程度で間氷期に戻るといふ、極めて特徴的なこぎり型の変動を示している。間氷期の期間は短く、1万~数万年程度であるのに対し、氷期は長く、かつ1000年程度の周期変動が卓越する気候となっている。興味深いことは、温室効果ガスである二酸化炭素やメタンなども、気温とほぼ同期した変動を示しており、これらの温室効果ガス変動も、氷期サイクルのメカニズムに密接に関係している可能性を強く示唆している。例えば、二酸化炭素の変動幅は、氷期の約180ppmから間氷期の約280ppmの間で、気温変化と整合的に変化している。さらに、氷期の最盛期には大気中のダストも増加しており、氷期における火山活動の活発化や大気循環(風)の強化を示唆している。ダストが氷期に多いことは、太陽放射に対する日傘効果が強化されて寒冷化をさらに促進・強化するという正のフィードバックとして働いた可能性もある。

氷期と間氷期の気候を特徴づけるのは、全球平均で10°Cも変化した大きな気温の変化に関連した、氷河や氷床などの雪氷圏の広がりの変化である。例えば、1万8000年前の最新の氷期には、北半球では北米大陸の北半分、現在のカナダ・アラスカに対応する地域全体とヨーロッパの大部分が氷床に覆われていた。温暖期に当たる間氷期は、現在の気温より全球で平均1~2°Cは

高い時期が1万～3万年程度続いた。植生分布などもこの氷期・間氷期サイクルに対応して全陸地スケールで変化していた。

人類は特に100万年前以降、アフリカから世界各地へ拡散しつつ進化する時期であったが、氷期サイクルに伴い東アフリカの湿潤・乾燥気候の分布が大きく変動したことは、原人類のさらなる進化とユーラシアへの移動を促す重要な契機となった。第四紀の寒冷な気候とアジアモンスーンの弱化に伴う中央アジア・西南アジア地域の広大な草原・ステップの形成は、多様な草食性動物の棲息の場となったが、この地域に移動した新人類の進化にとって、これらの草食性動物との共存関係は重要な意味を持ったと考えられる¹⁾。

■完新世における地球システムの変化と人類活動

約1万8000年前の最終(最新)氷期以降、地球全体は急激に温暖化し、全球平均で10℃という「劇的な」気温の上昇が起こっている。約1万年前には、完新世(Holocene)とよばれる温暖で比較的安定した間氷期の気候となり、植生分布は大きく北へ移動し、人類も南米大陸南端までも含め、大移動が世界各地で起こり、9000年前から5000年前前後は気候最適期(Climatic Optimum)と言われる、現在よりも温暖な気候になった。8000年前頃に人類はイネ・麦を中心とする農業を発見(あるいは発明)し、人類の文明が開始された。この農業革命は、同時に、人類が地球システムを能動的に改変する第一歩となった。米、小麦などの農耕の開始は、人類の定住生活と文明の黎明には不可欠であった。人類による地球表層環境の改変は、この時期から始まったといえる。ただ、農耕を始めて定住した人類は、気候変動や水文環境の影響を受ける存在であり、エジプトやインダスなど、いくつかの古代文明の衰退や滅亡も、気候変化や水環境の変化などが原因であったと推測されている。

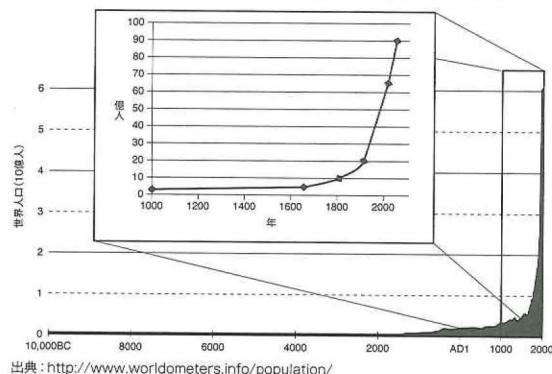
気候変化・変動の生態系や人間活動への影響を考えたときには、温暖化にしろ、寒冷化にしろ、気候のアノマリー(ぶれ)がどの程度の期間続くか、ということも重要な問題である。例えば、紀元約1000年前後の数世紀、「中世温暖期」とよばれる温和な気候が続く、ヨーロッパでは今は中南部にしかできないブドウ畑がイングランドまで広がっていたことが、ヨーロッパの歴史資料などから指摘されている。しかし、この時代、熱帯やモンスーン地域では、

洪水と干ばつが繰り返される変動幅の大きい気候変動が続く、当時の文明を揺るがしていた²⁾。西・北欧などの中・高緯度地域では温和な気候も、アジア・アフリカや中南米の熱帯・亜熱帯域では、エル・ニーニョなどに代表される大気海洋系の変動が大きく、これに伴う干ばつ・洪水が大きな振幅で繰り返されており、必ずしも良い気候ではなかったのである。

人間活動が地球規模の気候変動に与える影響として、現在、大気中での二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの増加が大きな問題になっているが、人類は文明の開始当初から、森林を破壊し、農耕地や放牧地への転換を行って、地表面状態を改変してきた。文明化とは、別の見方をすると、原始の自然を、人間の居住空間に変換していく過程でもあった。人工衛星等による観測では、現在の地球の陸地表面で、人間の手が全く入っていない地域は非常に少なく、現在の森林面積は人類が農耕を始めた時期の約半分といわれている。その残った森林も人の手が全く入っていない部分はほんのわずかである。

このような地表面改変は図2に示すような人口の増加と共に、次第に激しくなってきたと考えられる。1600～1800年頃から人口増加率が上がってきているが、18世紀から19世紀の産業革命以前に、ヨーロッパでもアジアでも森林から農耕地への改変は大きく広がった。1700年から1850年までのアジア(インドや中国)での拡大は、当時のヨーロッパの帝国主義列強による植民地化とも密接に関係している。このような森林から農耕地、都市域への土地利

図2 後氷期の1万年前および1000年前からの世界の推定人口の変化



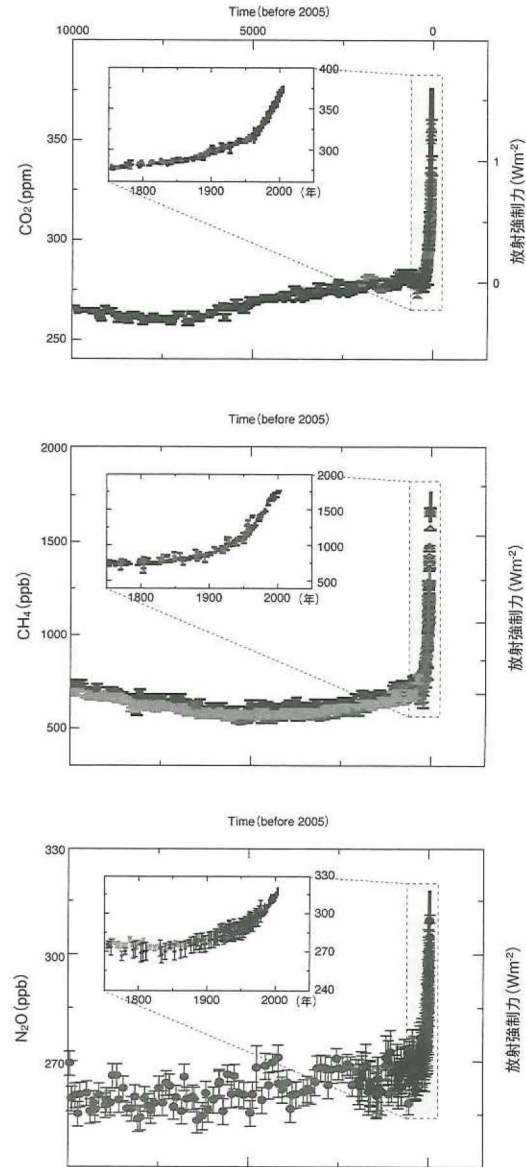
用変化は、アルベード(反射率)や植生による蒸発散の割合などを変化させることにより、少なくとも地域的・局地的な気候変化を引き起こしていた可能性が高い。著者らは、この可能性を、1700年から1850年にかけてのアジア南東部の地表面の変化を境界条件として、気候モデルによる数値実験で調べたところ、夏季のインドモンスーンが1700年から1850年にかけて弱まったことが示された³⁾。緑の森林は、農耕地よりもアルベードが小さく、効率よく太陽エネルギーを吸収することや蒸発散による潜熱の増大による水蒸気量の増加が降水量増加を引き起こしていたのである。このような、森林破壊による局地的・地域的な気候の変化は、アマゾン地域でも指摘されている。

■産業革命以降の地球システム変化 ——急激に増大する人間活動の影響

19世紀の産業革命以降、石炭・石油などの化石燃料により、エネルギー革命が引き起こされたが、これが大気中のCO₂、CH₄などの温室効果ガスの急激な増加を引き起こした。どの程度急激であったかは、例えばCO₂では、1850年頃に280ppm程度であったのが、近年は400ppmにまで増加している(図3)。この値は、先に述べた氷期サイクルに伴うCO₂濃度変化のサイクル(180~280ppm)をすでに大きくはみ出した値であり、少なくとも過去数十万年の気候のサイクルから見ても、異常に大きな変化と言わざるをえない。このCO₂増加が数十万年の氷期サイクルのなかでの一瞬のノイズで終われば、気候システムへの影響も小さいかもしれないが、増加が止まらず、今後も100年、200年と続けば、影響は大きいであろう。もちろん、一方で、このような温室効果ガスを出す化石燃料があとどのくらい持つかという議論もあるが。

産業革命以降の人間活動が大気を変化させたもうひとつの要素は、エアロゾル(大気中の微粒子)の増加である。もともと砂漠の砂の巻き上げなど、自然のエアロゾルもあるが、近年大きく増加しているのは、石炭・石油などの燃焼や、森林火災・焼畑など(バイオマス・バーニング)によるものである。特に主として化石燃料の燃焼によって増える硫酸エアロゾル(sulphate)量などは、1900年代後半に急激に増加している。これらのエアロゾルは、直接空を覆って、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

図3 温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)の過去1万年における変化
1750年頃から現在に至る変化も小さな図で示されている



出典：IPCC, 2007(参考文献4)

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が問題になっている。即ち、エアロゾルは、一部(煤など)を除くと、全体としては、温室効果ガスの効果とは反対に、地球大気を冷却する方向に働くが、その大きさは温室効果の3分の1程度と推定されている。

さて、産業革命以降の全球的な気温の変化は20世紀初めから約100年で1°Cの上昇であり、最近の「地球温暖化」は、人類がかつて経験したことのなかった気候の変化である可能性がある。最終氷期から温暖期に至る「劇的な」気候変化の時期も、平均してみると、1万年間、短く見積もっても1000年間で10°Cの変化である。ということは100年ないし1000年に1°Cの気温上昇である。これに対し、最近の100年間における1°C上昇は第四紀の気候変動のなかでも極めて大きな変化といえる。しかも、二酸化炭素濃度は19世紀の産業革命以降、急激に増えつづけ、現在すでに400ppmであり、今後の人間活動次第では2100年には1000ppmに達するというシナリオもあり、その場合、気温上昇は4°C程度になると予測されている。さらに、温暖化が水循環過程に作用して水環境にどう影響するかは、農業などの人間活動への影響として重要な問題である。最近の「地球温暖化」では、豪雨頻度と干ばつ頻度の両方が増えているという傾向が指摘され、21世紀の予測でも同様の傾向が予測されている⁵⁾。

■地球システムと人類の将来をめぐる

18世紀のヨーロッパで開始された産業革命はさらに、石炭・石油などの化石燃料の利用により、大気組成の改変や水・物質循環の変化などを引き起こし、特に20世紀後半以降には、地球システムの改変が気候だけでなく、多くの環境要素を大きく変えつつある。特に産業革命以降、地球環境に対する人間活動の影響は急速に顕在化しており、現在は、地球史のなかでも、完新世と区別して人類が大きく地球システムを変えつつある時代として、Anthropocene(和訳は「人新世」または「人類世」とする主張もある⁶⁾)。

人新世では、完新世の地球システムのバランスが崩れ、「地球の限界」が近づきつつあるのではないかと、という懸念⁷⁾がなされている。人類は今、その生存基盤である地球システムの変化の実態を見守りつつ、いかにこの変化に

立ち向かい、人類と生命圏にとって持続可能な状態に転換できるかが、喫緊の課題である。このためには、人類活動による地球環境への影響評価だけでは不十分で、どのような人類社会を目指すべきか、文明のあり方などの価値観を含む考究も必須であり、自然科学と人文・社会科学が連携・融合した学際的研究が必要である。さらに、持続可能な社会へむけた転換のためには、科学者と(政策担当者、実業者、市民などを含む)社会との超学際的連携・協働が必要である。このような学際、超学際的な連携・協働により国際的な地球環境研究を推進するプログラム「Future Earth」が立ち上げられた。Future Earthはまさに地球と人類の持続可能性を追求する「社会のための科学」を国際的に推進しようという運動とも位置づけられる。Future Earth全体の科学構成は、地球システムの理解、地球システムの利活用、および持続可能な地球システムへの転換の3つの柱からなり、それらの連携・統合を図っていく⁸⁾。人類がいかに持続的に地球と共存していけるか。21世紀は人類社会にとって正念場の世紀である。

参考文献

- 1) 安成哲三「『ヒマラヤの上昇と人類の進化』再考——第三紀末から第四紀におけるテクトニクス・気候生態系・人類進化をめぐる」『ヒマラヤ学誌』第14号、京都大学ヒマラヤ研究会、2013年、19～38頁
- 2) フェイガン・B著、東郷えりか訳『千年前の人類を襲った大温暖化』河出書房新社、2008年
- 3) Takata, K., K. Saito and T. Yasunari. Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation. Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 2009 doi: 10.1073/pnas.0807346106
- 4) IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
- 5) IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013
- 6) Crutzen, P. J. The Anthropocene: Geology of mankind. Nature, 2002, 415, 23
- 7) Rockström, J., et al. A safe operating space for humanity, Nature, 2009, 461, 472-475
- 8) 安成哲三「Future Earth——地球環境変化研究における新たな国際的な枠組み」『季刊 環境研究』170号(特集: 地球環境科学とグローバルガバナンス)、日立環境財団、2013年、5～13頁
安成哲三「持続可能な地球社会へむけてのあらたな国際的枠組み——Future Earthの取り組み」『SEDer』第10号(特集: 地域と世界をつなぐ学知)、シーダー編集委員会編、昭和堂、2014年、6～13頁