

宇宙農業から考える 地球への人類の爪痕

山下雅道



1)

私は火星に行ってそこで生きている生命を見つけないのですが、歳をとり 身体のいろいろなところが壊れてきて、息子や娘は「自分で火星に行くのは無理だから 火星有人探査のタネを撒くだけで我慢しなさい」と私に言います。宇宙農業サロンというのをしているのですが、そのロゴは簡単な宇宙服を着て 火星にタネを播いている 岩波文庫の奥付にも使われているミレーの「タネ撒く人」の絵をもとにしたものです。

火星に播いたタネから 芽がでて植物が育ち、ぶら下がっているのはミノムシ：昆虫です。この講義を受けている若い人たちに 火星への夢を継いでもらえないかと 今日は勧誘しにきました。

本日の講義では 2つのことをお話します。はじめに宇宙といっても火星に的を絞っているのですが、宇宙での農業の構想を紹介します。そして1万年前からはじまった農業など人類の活動が地球にどんな爪痕を立てているのかを 地球の大気の変遷と近年の全球温暖化について解説します。

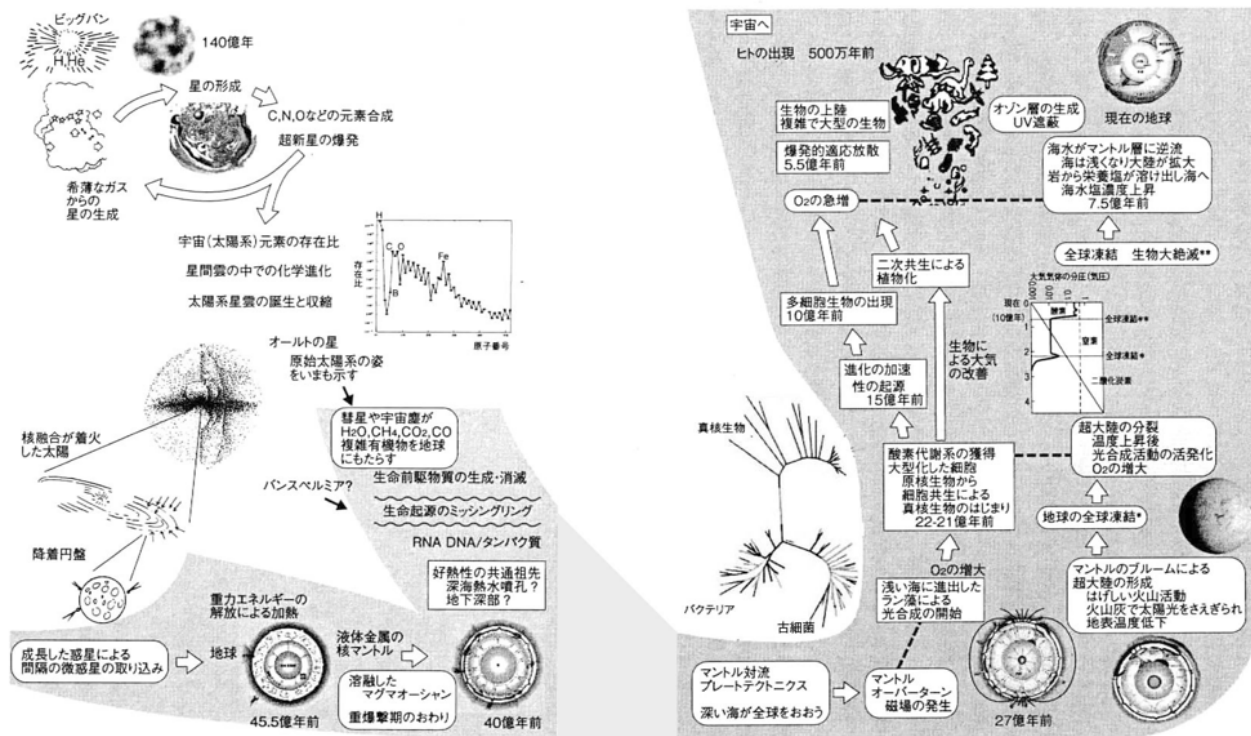


図 0.3 宇宙の誕生と生命の誕生、そして生命体による生命の起源の探索 (山下作成)

2)

上の図は すでにビッグヒストリーの講義で学んできた 宇宙の始まり：ビッグバンから 地球上の生物が多様な種に分化した現在にいたる 宇宙および地球で起こったさまざまなイベントを 1枚にまとめたものです。

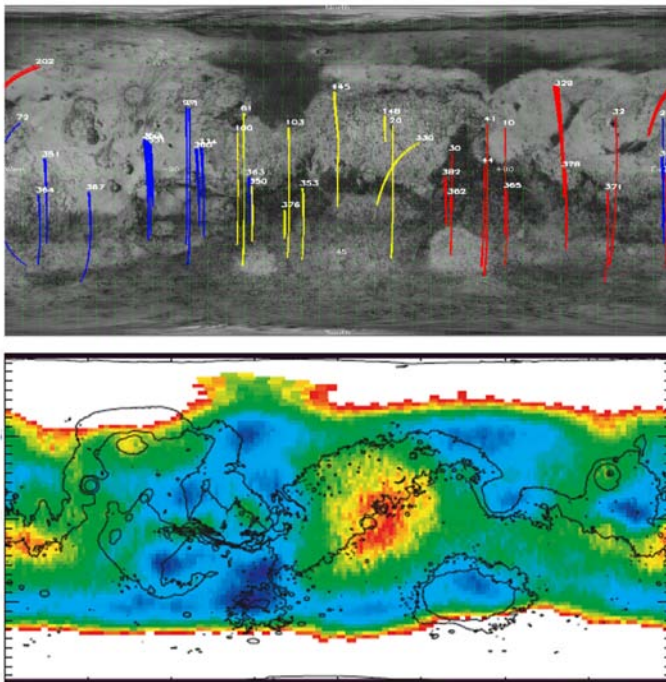
火星での生命探査

地球でみつかる生物はじつに多様なのですが、（これまで見つけれられた生物種の範囲では）単一の共通祖先をもち、したがって生命の仕組みも基本的には同じです。物理や化学の法則が宇宙のどこにいても同じだろうと認められているのですが、生物学の基本的な概念や法則が地球限定なのか あるいは宇宙普遍なのかは わからないのです。



火星 3)

そこで 地球以外で生物がいそうで 21世紀中には有人探査できそうな火星をねらっています。火星を肉眼で あるいは望遠鏡でみたことはありますか？スマートフォンやタブレットのアプリケーションで惑星（Planets）というアプリケーションがあります。スマートフォンなどに内蔵されているGPSと磁気コンパスの情報をつかい、掲げて向けた方向に見える星が何であるかを表示します。また月や惑星については その場所での可視時間帯も表示します。火星など惑星は 太陽や月の通る領域にでてきます。火星は色が赤味を帯びているので、可視時間帯であれば容易に見つけることができます。



火星が赤味をおびて見えるのは、表面に酸化鉄（ベンガラでわかるように赤味のもとになる）が多いからだといわれています。

火星の生命探査ということでは1976年にNASAが火星表面に送った2機の探査機バイキングで 思わせぶりの信号は出ただけけれど、表面は酸化的な環境であって、生命体はいないだろうと判定されました。

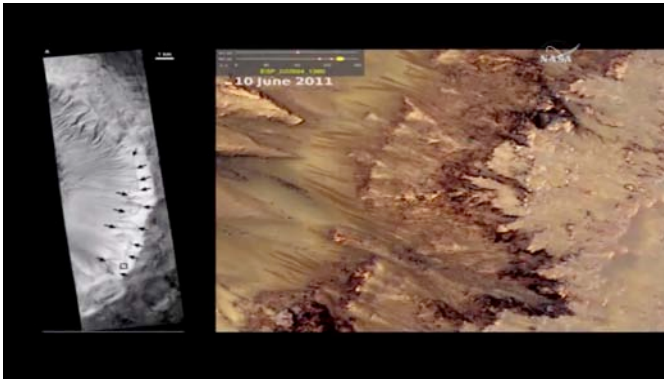
ところが1990年代なかばから 南極でみつかった火星からの隕石での発見など、火星で現在も生きている生物の可能性を含めて多くの観測データが得られています。

左の上の図 4) は、火星の周回軌道から火星の表面を赤外線で観測し、大気中に微量ですがメタンを発見した結果です。赤がメタン濃度が高く、青が低い。地球の大気中に

もメタンが含まれます。火星の大気は希薄なうえにメタン濃度は10ppbほどで、地球ならウシ数頭分のゲップ由来のメタンの量です。火星内部から大昔に彗星により供給されたメタンが蓄えられていて 滲み出ているというのが仮説の一つです。

下の図 5) は火星の表層60cmから1m以内にある水（測定しているのは水素）で、赤が多く、青が少ない。両極部分では二酸化炭素がドライアイスの厚い層をつくっていた時の観測で、水の量はわかりませんでした。その後の観測で得られたデータからは、極の水を溶かせば全球を10m ほどの深さで覆える量であると推定されています。地球の海の水の量からすれば僅かですが、火星にも水はあります。赤道域でもあるところにはあります。

生命活動には液体の水が重要な要素です。火星の表面を詳しく時間をおって観測したところ、クレータの崖の部分に涙の流れるような像が現れ、時間が経つとそれが消えるのを繰り返す部分がいくつか見つかりました。表面でも流れる水があるということなのですが、表面の温度から 過

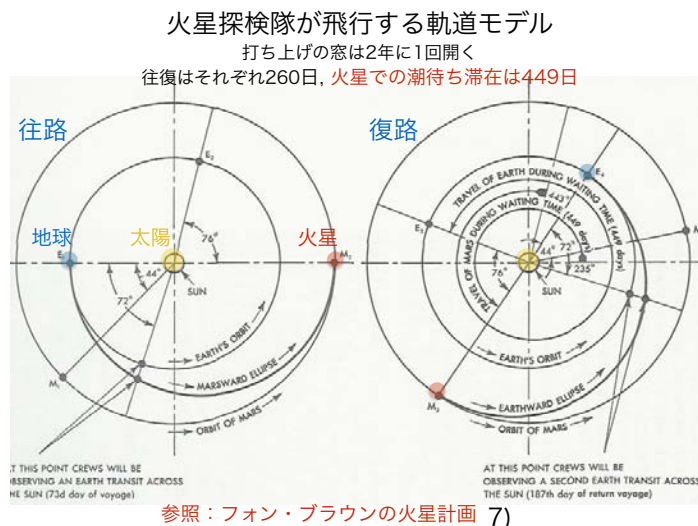


火星の表面を流れる水⁶⁾

います。したがって 現在の火星でも生命をいとなむ生物がいてもおかしくはありません。

火星で生命を見つけようという動きは 世界でいくつかのグループが計画しています。それぞれのグループは火星のどこにいつ探査するかを腹案を暖めています。もちろん 日本のグループもその案をもっています。

火星にはどのようにして行か



キューバ危機（1962年）のあと ソ連に対抗するなにかよい有人宇宙計画はないかと米国大統領から諮問されたフォン・ブラウンは、多くの宇宙開発者が夢としていた火星探検を提案しました。しかし当時の開発資源では火星の成算がたたず、そのかわりに月が選ばれ、1969年にみごと月面に人間をおくことができました。

「アポロ13」の映画にも描かれていますが、月往復は1週間で可能です。いつでも月には行けます。

ところが火星に行く打ち上げの窓は2年に一回しか開きません。地球は太陽の周りを1年で回ります。火星は約2年で1周です。地球から打ち上げられた宇宙船が太陽を挟んで反対側でちょうど火星に巡りあうというのが ロケットをうまくつかう軌道です。この軌道は火星の公転周期2年ということから2年に一度しかとれません。地球から火星には260日の飛行ですが、火星に到着してもすぐに地球に帰ることはできません。往きと同じく 打ち上げの窓は2年に1回しか開かず、潮待ちに上の軌道では449日を要します。火星往復には2.5年から3年もかかり、かつ火星の上で過ごす期間が長いのです。

有人飛行での生命維持の要求と国際宇宙ステーションでのシステム

火星の有人探査は はじめのうちは6人規模です。3年にわたる期間 すべて弁当をもっていくと想定しています。その段階を経て100人規模の探査基地が20年にわたり運用されるようになる100年後には、使い捨ての生命維持よりは 循環再生型の農業が有利になると考えています。生命維持には、1人1日あたり、水 36kg、酸素 1kg、食料 2kg を要します。

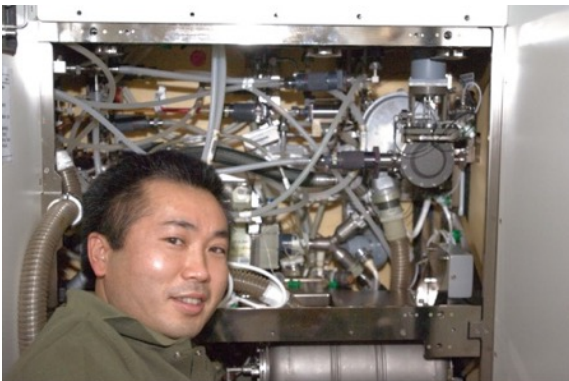


8)

<http://kibo.tksc.jaxa.jp/letsview/visibility1/tokyo/>

現在運用されている国際宇宙ステーションでの生命維持がどのようになされているかをまず見てみましょう。

国際宇宙ステーション(ISS)を肉眼で見たことがあるでしょうか。夕暮れ時と夜明け前に、空は暗く地上から400kmの高度を周回するISSには太陽光が当たる条件で見ることができます。JAXAのウェブサイトにはISS予報サイトがあり見るのできる日時と方位・仰角がわかります。



ISS019E011464

ISSの水再生装置 9)

若田宇宙飛行士の後ろにあるのが、ISS内の水再生循環装置です。尿などの廃水を蒸留したのちフィルターを通して再生し、再び飲水などに利用します。水の使用量は多いので、再生循環装置が少々重くても引き合います。水の一部は電気分解されて酸素を発生させてキャビン内の空気に補充します。このような水の再生循環利用には宇宙飛行士の心理的な問題もあるようです。

宇宙トイレ¹⁰⁾

食料は地上からはこびあげ、排泄物は太平洋に捨てています。ISSのトイレでは微小重力下で体をトイレに対して固定するための足の拘束部や便座に体を押し付けるための手で掴む取っ手があります。尿と尿はわけて収集します、便座にあいている丸い孔から尿を空気の流れて吸い込み遠心して出てこないようにします。尿は右の方に伸びたホースのさきアダプタを付けて収集し再生循環装置に送ります。溜まった尿は定期的にとりだしてゴアテックスの袋のなかに貯蔵して最後は貨物船のなかにいれて太平洋の上に落とします。

食料は地上から運び上げ、固体排泄物は太平洋に捨てるという、使い捨ての生命維持システムを使っているのです。地球からアクセスが容易な月面基地までは、ISSと同じような生命維持システムを用いると考えられています。

ISS内での調理室（ガレー）は航空機のカレーとおなじような構成で作られています。冷水と熱水が供給され、食品はレトルトか冷水・熱水でもどしてから食するようなものが準備されます。常温で1年間保存しても病原性のバクテリアや成分を与えず、食味も良好に維持されることが宇宙食への要求です。JAXAの設定した基準をクリアした宇宙食には「宇宙日本食」という名称で地上で販売してよいことになっています。

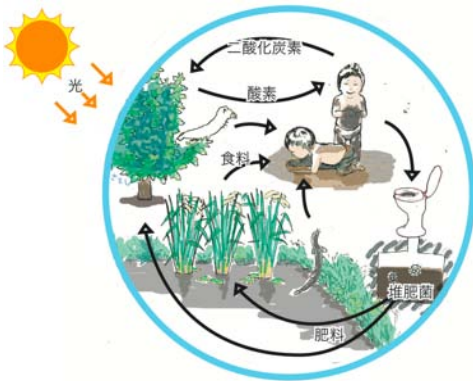
宇宙日本食¹¹⁾



宇宙食として開発されたラーメンは一口で食せる大きさに麺が手作業でまとめられて製造され、スープは飛び散らないように 増粘剤が加えるなど 宇宙ならではの工夫がされています。

宇宙ラーメン 12)

火星での宇宙農業の構想

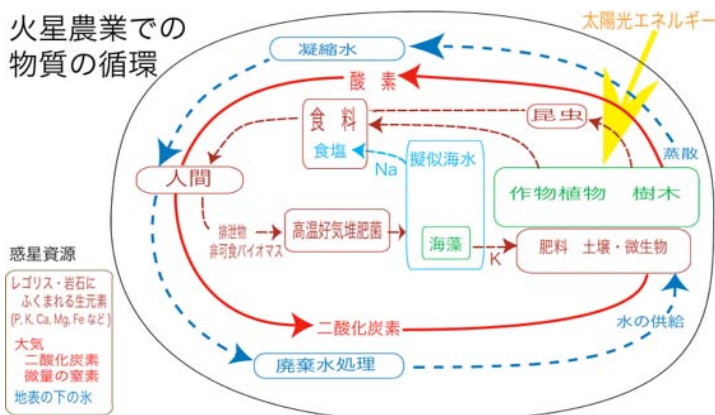


火星の初期の有人探査は 6人規模であり、ミッション期間分の弁当や着替えなどを持って行くことになります。ISSと大きく異なるのは、生命探査の対象である火星を地球由来の微生物や有機物で汚染することはできない（惑星防護）ので、尿などのゴミを宇宙船の外に捨てることができないことです。

100人20年 の規模のミッションにまで発展すると、使い捨てより代謝産物などから酸素、食料、水を再生して循環利用する生命維持システムのほうが輸送する質量などで有利になるだろうと推定されています。地球周回軌道や月面基地では （水を除き）生命維持のための消耗品の積算

量より再生循環するための設備のほうが重いので、宇宙農業はひきあわないのです。月では火星の練習をすると考えています。

火星農業での物質の循環



火星農業は食料、酸素-二酸化炭素、水の3つの物質循環のループで構成されます。一人分の食料を作物植物の光合成により生産すると、同時に酸素が得られます。食料と酸素の物質質量比は化学量論的にきまり、人間が食料を代謝して生きるエネルギーを得るのに必要な酸素が得られます。排泄物や非可食のバイオマスからつくる堆肥に含まれる生元素は植物がふたたびバイオマスを生産するのに必要な量があります。ただ

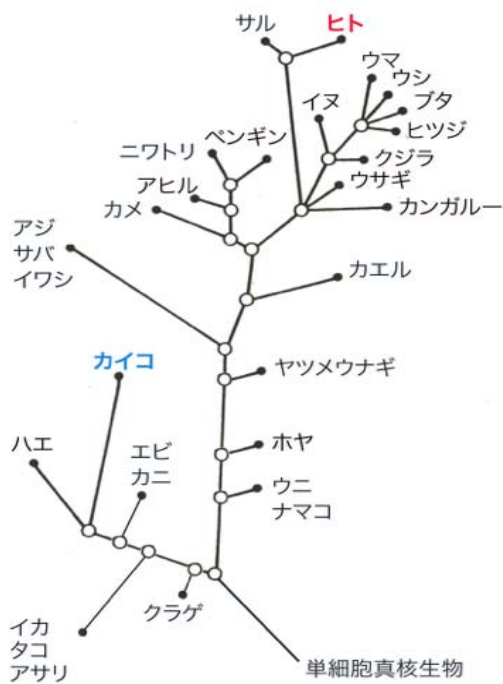
し植物が利用できない化学的な形態になると循環のループからは落ちてしまうので注意が肝要です。植物は根から水をすいあげて肥料の成分を運び上げ、太陽光で二酸化炭素と水から酸素と食料を作るのですが、一日分の食料を生産するには200kgの水を葉から蒸発する必要があります。したがって、2kgの食料を植物に生産させると、毎日水200kg、酸素1kgが得られ生命維持の要求を満たすことができるのです。



火星での生命維持、食材 13)

火星での農業でなにをどれだけ栽培しないといけないかは、栄養が火星での生活に過不足ないように設計して決まります。生きるためのエネルギー、体を

作り変えるためのタンパク、そのほかに必要となる成分を摂食する必要があります。過不足ないように設計した食材の一例を写真に示します、コメ 300g、ダイズ 100g、サツマイモ 200gでエネルギーとタンパクをとり、緑黄色野菜 300gでヒトが体内で合成できなくなってしまったビタミンを補給します。塩（ナトリウム） 3gは動物の体液が多細胞化したときの海水とおなじように維持するために植物からは摂れないので 別に与えます。ベジタリアン食材では 欠ける成分があります。それは脂質です。植物の油と動物の脂では基本的な分子が異なります。カイコのサナギ 50g、ドジョウ 120gを加えます。インドのブラーミンはベジタリアンですが、動物のミルクやヨーグルトから脂質を摂ります。



進化系統樹 14)

ヘルシーシルキー火星クッキー 15)

酒まんじゅう風 火星のコメ、ダイズ、サツマイモ、カイコ



コウジカビとイーストを使う

左の図は 動物の進化系統樹です。共通の祖先からどのように分化してきたかを示しています。日本を含む東アジアでは この系統樹にあげられた種のほとんどを食用しています。

進化系統上近縁の種は食べたときの味やテクスチャーが似る傾向があります。エビやカニは高級食材とされています。したがってこれらに近縁の昆虫の食味は似ているのです。

昆虫食は世界の各地の食文化としてあります。日本でもイナゴの佃煮は水田のある各地で見られます。長野県などでは、カイコ、ハチ、水棲昆虫が重要なタンパク源として受け入れられてきました。古くは世界のどこでもさまざまな昆虫が食されていたのが、人糞の化石からわかります。

どのようにして火星での食材を料理するかが 次のにあります。ヘルシー・シルキー火星クッキーというレシピを紹介します。

ダイズから豆腐を作ったときに得られる食物繊維がたっぷりのオカラ、サツマイモの粉、コウジカビの産生するアミラーゼという酵素でコメからつくった甘酒、そして急速に加熱して匂いのしないように調理したカイコのサナギにイースト（酵母）を加えてドウをつくり、発酵させたあとに小さく整形して焼くと、ふっくらとしたクッキーができます。ただしマーガリンや砂糖をいれていないので、食べるときは水を用意しておかないと、喉につまりむせます。

火星で農業土壌をつくる



火星では水耕栽培ではなく 土耕を想定しています。火星の表面には無機質だけのレゴリスという砂のような物質の層があります。火星のレゴリスから腐植やいろいろな生物が住み作物植物にとって豊かな農業土壌を作れるかを調べたのが NASAが極の近くに送ったフェニックスです。表面直下に水のあること、レゴリスに水をかけると弱アルカリ性を示し 農業フェニックス（想像図） 16)

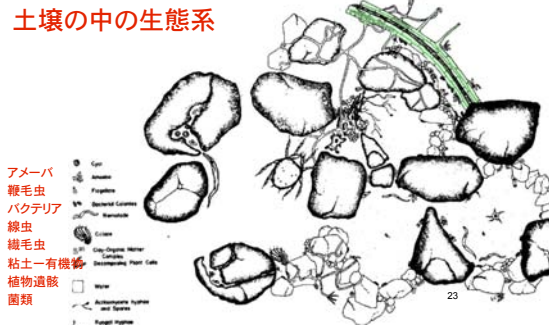


土壌の生成が可能であると判定させるものでした。地球の荒地では鉄明礬石などができて強酸性になります。

映画「オデッセイ」¹⁷⁾は、植物学者が独り火星に残され、クルーの排泄物から作った堆肥をレゴリスにまぜて土壌をつくりを、ジャガイモを栽培・収穫して生き延びるという筋書きでした。

豊かな土壌のなりたち 共生する菌類などは植物の根がアクセスできない部分から肥料成分を運ぶ 18)

土壌の中の生態系



土壌は無機質の鉱物の粒子に腐植といった有機物が含まれ、そのなかに多様な生物種からなる生態系が構成されています。植物の根は土壌のなかに細い根毛をたくさん伸ばして水分とともに養分を吸収します。植物と共生関係にある菌根菌（きのこ）は 更に広い範囲に菌糸を張り巡らせ、リン酸塩など不溶性でそのままでは植物が吸収できない養分を 菌が分泌する酸で溶かし 植物の根に供給します。そのかわりに植物は共生する菌に光合成産物を与えます。土中生物はミミズからバクテリアまで様々で、その中には植物の生育を阻害したり障害を与える線虫やカビも含まれます。



下肥舟 19)

ヒトの排泄物を肥料にするのには技術を要します。日本では都市と農村をつなぐ物質循環が（江戸時代から昭和中期まで）よく機能していました。近郊（東部、北部）の農家は 江戸市中のトイレから糞尿を汲みとるのに金を（大家に）払い、堆肥として農作物を栽培し、市中に販売して利益を得ていました。その循環を維持するのに 一年を通して農作する体系もできました。左の写真は尿尿を市中から近郊農村に運んだ下肥舟で、

東京・葛飾、埼玉・戸田の郷土博物館に誇れる文化・歴史資料として常設展示されています。

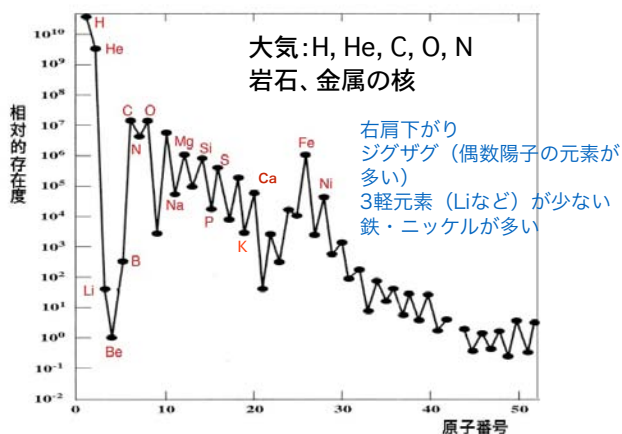
一方、西欧の都市では排泄物に媒介された疫病の蔓延を記憶しており、家畜の尿尿や敷きワラなどから堆肥をつくることはありますが、ヒトの排泄物からつくった堆肥を食物作物に施すことは禁止されていたりします。

地球の大気と人類活動

地球に立てられた人類活動による爪痕がどのようなものであるか、地球の大気についてみてみましょう。農業革命、産業革命を経て 人類の活動は地球の環境に大きな影響をあたえています。大気中の温室効果ガスの濃度が急激に増大して全球温暖化にむかっているとも警告されています。

太陽系や地球がどのようななりたちであるのかは その元素の存在比から決まります。宇宙がビッグバンではじまり、幾つかのイベントを経て何年かたつと水素とすこしのヘリウムの原子が生成しました。ムラムラの宇宙が銀河や星をつくり、高密度・高エネルギーの環境で重い原子が生成し 星が一生を終える

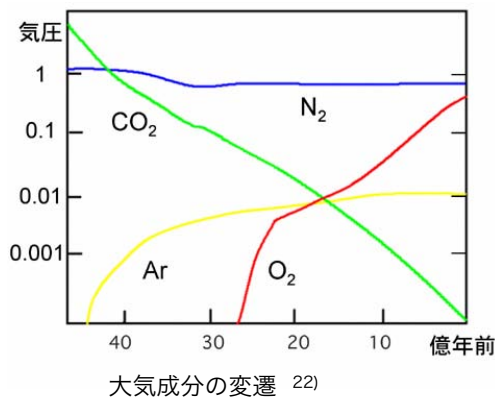
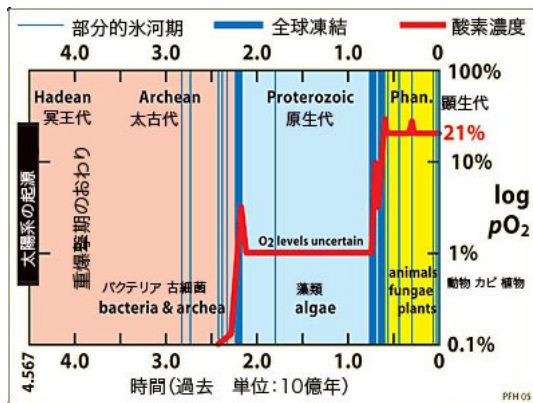
宇宙(太陽系)での元素の存在比 ²⁰⁾



と爆発して生成した物質を周囲に撒き散らし、次の星を作る素材となります、太陽系は何回かこの過程をくりかえしたあとに作られました。元素の存在比の特徴4つを図のなかに記してあります。地球の大気、地殻とマントルをつくる岩石、中心の核の金属の成分はこの元素存在比から決まります。生命体をつくる生元素のセットも元素存在比からみると面白い。

惑星大気の比較

	金星	地球 ²¹⁾ 生命のない	火星	生命のある 地球
二酸化炭素	96.50%	98%	95%	0.03%
チッ素	3.50%	1.90%	2.70%	79%
酸素	微量	0	0.13%	21%
アルゴン	70ppm	0.10%	1.60%	1%
メタン	0	0	0.01 ppm	1.7 ppm
温度 (°C)	459	240 から 340	-53	13
全圧 (bar)	90	60	0.0064	1

酸素濃度の変遷 ²³⁾

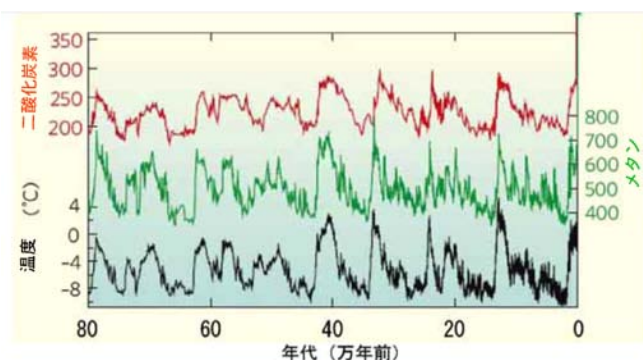
太陽系の元素のうち固体になる成分が凝縮してできたのが、水星、金星、地球、火星の固体惑星です。地球ができてはじめにあった一次大気は水素とヘリウムでした。太陽の活動が盛んになって一次大気は吹き飛ばされました。その後で、冷たい太陽系外縁から彗星などが飛び込んできて二次大気（二酸化炭素、水、メタン、チッ素）をつくりました。左の表は固体惑星の大気の組成です。太陽からの距離で組成は少し変わりますが、仮に生命がない地球を仮定した3つはおよそ一定です。変わるの、太陽からの距離が大きく支配する 表層大気の温度と圧力です。ところで 生命のある地球は大気成分が他の固体惑星とは大きく異なります。生物の光合成をはじめとする作用により 二酸化炭素は減少し そのかわりに高濃度の酸素が大気に含まれます。

地球の大気が二次大気生成時から現在にいたるまでどのように変化したかの概念図を左に示します。チッ素は化学的に安定でその分圧はずっと変わりません。アルゴンは地球内部のカリウムの放射性同位体が壊変して染み出し、どんどん濃度を高めてきました。

地球内部や表層で生起したイベントと、全球凍結をさかいにして 主要な生物の種類が交代（原核生物—真核生物—多細胞生物）し、酸素濃度が増大して活発な生命活動が可能になったという概念を左の図では説明しています。

人類の活動が大気や気候に大きな影響を及ぼし始めたという以前に、地球の環境は生物の進化の過程と強く関連しながら変化してきて、生態系のたぐみな仕組みで維持されているのです。

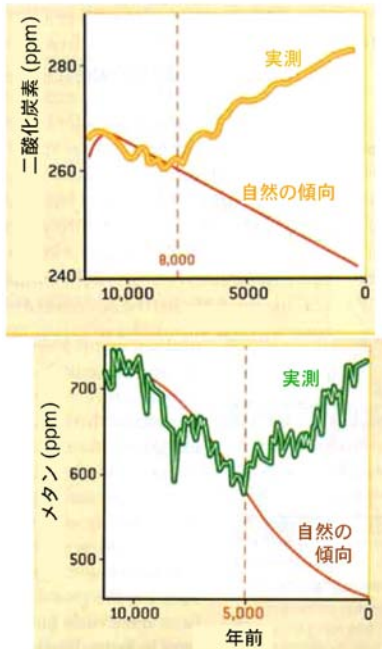
全球温暖化と農業



温室効果ガス濃度の上昇が人類の活動の結果としてすすむことで 全球温暖化が起きています。

地球表面の温度をきめるのはなんといっても太陽光の入射（して吸収される）エネルギー量です。左のグラフ ²⁴⁾ は80万年前からの地球表面温度と 温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの大気中濃度の履歴です。

およそ10万年周期で地球表層温度が寒暖を繰り返しています。これはミランコビッチ・サイクルといって、原因がミランコビッチにより明らかにされています。地球の公転軌道の離心率の周期的変化、自転軸の傾きの周期的変化、自転軸の歳差運動という3つの要因により、地表での日射量変動するのが原因です。温度が上がると二酸化炭素、メタンが増えるのがグラフからわかります。しかし温室効果ガスが高温になる原因ではなく、結果として濃度が上がり さらに表層温度を押し上げているということです。



いまから1万年前はこのミランコビッチ・サイクルの温暖期でした。温暖であったことから様々な試行錯誤が可能になり、農業革命が起こりました。そして、その後（いまも）地球は氷期に向かったはずなのです。

ところが、8千年前から土耕により地中有機物が掘り出され酸化して大気中の二酸化炭素濃度が増大し、5千年前から水田が始まり底泥で嫌気発酵してメタンが放出されるようになりました。²⁵⁾

この農業による温室ガス濃度上昇により 氷期にむかい寒冷化する傾向を阻止し、温暖な気候がずっと維持されたのを次のグラフ²⁵⁾で示しています。

300年前に産業革命がおこり、人類は筋力にかわる機械力を利用し始めました。化石燃料を採掘してそれを利用すると、地中に炭素が埋蔵されたのと引き換えに大気中に増えた酸素を消費して濃度を下げます。増大している二酸化炭素は一部が海に吸収されるため、大気中酸素の濃度の減少分は 二酸化炭素の増加分より多いのです。いずれにしても、急速な工業化と化石燃料の使用量の

増大は、温室効果ガスにより地球の表面から放射される赤外線が吸収されるため、表層大気の急激な上昇をもたらし、全球的な温暖化が進んでいます。

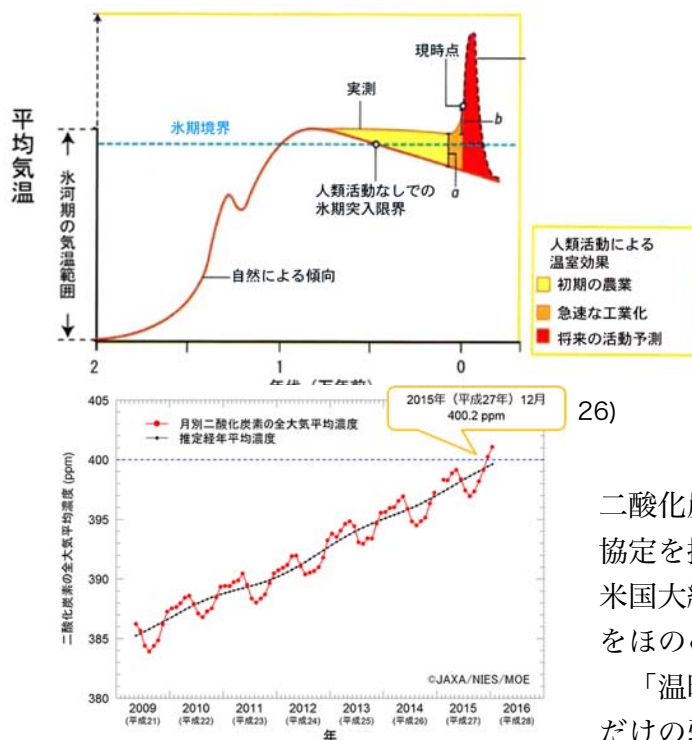
2015年12月には二酸化炭素の濃度が400ppmを超えました。大気中の二酸化炭素濃度は、季節変動し、春先に一番高くなり、夏の活発な光合成により低下します。

全球的な温暖化によるリスクがさまざまに認識され、抑止にむけた国際的な取り組みがなされています。国連気候変動枠組条約(COP) がその一つです。

二酸化炭素排出量の多い米国、中国がCOP21パリ協定を批准し 発効したのですが、トランプ次期米国大統領は米国の競争力をそぐとの理由で脱退をほのめかしています。

「温暖化の科学」にもトランプの攻撃をうけるだけの弱味があるのかもしれません。第一は、温

産業革命以降：化石燃料の利用による二酸化炭素濃度の急上昇

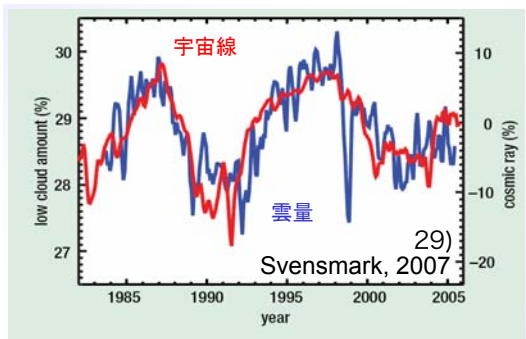


26)

暖化に関する気候モデルがいくつか作られ、その有効性を過去の気候データをどれほどよく再現できるかで検証してきたのですが、2000年以降の地球表面温度がさほど上昇しなかったことをそれらのモデルが予測できませんでした。モデルのなかに適切に組み入れられていない要素があるのかもしれません。

第二に 「全球温暖化で極地方の氷が溶けて海水面が上昇して水没する地域がでてくる」というのは確かです。しかし、気象の激越化などによる個々の被害の原因を温暖化のみに求めるのは不適切かもしれません。大気の運動の蛇行の変化などが個々の気象現象の直接の原因かもしれません。

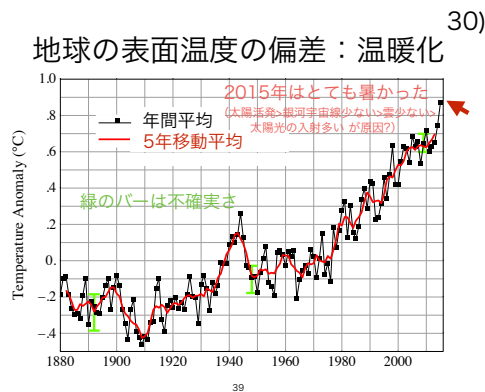
第三に、温室効果ガス排出抑制が温暖化抑止の唯一あるいはもっとも効果的な手段であるかは疑問です。ジオエンジニアリング²⁷⁾ といった別の提案を検討することが必要かもしれません。化石燃料の問題は 温暖化はともかくとして エネルギー資源として持続可能かどうかとも考慮すべき重要な要素です。石炭については燃焼により生成するイオウ、チッ素酸化物が（除去されず大気中に放出されるなら）公害問題もあります。



温暖化の気候モデルのなかに適切には組み込まれていないかもしれない要素のひとつは太陽活動の変動です。太陽活動がさかんになると太陽のつくる磁場が強くなり 銀河起源の宇宙線の地球への飛来頻度が落ちます。雲のもとになる凝縮核の一部は銀河宇宙線が大気中に入射することで作られます。²⁸⁾ したがって太陽活動がさかんになると雲量が減り、太陽光の入射量が増大し、地球の表面温度が高くなります。太陽活動の指標は黒点数で、およそ11年周期で変動しますが その挙動を正確に予報するのはいまのところ困難です。

2000年以降しばらく足踏みしていた表面温度は2015年に近年では最高の温度となりました。これは、太陽活動がさかんになったことがひとつの原因と思われます。

1600年ころに望遠鏡が発明されて以来、太陽の黒点の観測は継続されています。気候の変動がどれほど黒点数（銀河起源宇宙線）と相関するかを知ることができます。



宇宙農業は地球生態系のエンジニアリングのためのテストベッドになる

宇宙農業は 地球圏外に生命を維持するためのエンジニアリングです。環境の制御ということでは、熱的な環境や大気の組成の調節を 生態系のなかの物質を循環利用させながら実現します。このようなエンジニアリングは、地球生態系での生命活動がどのようにたくみに営まれているかの理解なしには到底のところできません。そして宇宙農業は、地球生態系を健全に維持し 持続発展可能な文明を創造していくためのテストベッド（どれほど我々が自然を理解しているかを検証するという意味でも）として使うこともできるのです。

References

- 1) 宇宙農業サロン <https://sites.google.com/site/spaceagriculture/home>
- 2) 生命の起源をさぐる: 宇宙からよみとく生物進化 東大出版会 (2010) より改変
- 3) <http://marsmobile.jpl.nasa.gov/programmissions/science/>
- 4) Vittorio Formisano, Sushil Atreya, Thérèse Encrenaz, Nikolai Ignatiev, Marco Giuranna; Detection of Methane in the Atmosphere of Mars, Science, Vol. 306, Issue 5702, pp. 1758-1761 (2004)
- 5) 2001 Mars Odyssey, Los Alamos National Laboratory
<http://www.redcolony.com/newsarchive.php?id=030216>
- 6) NASA <https://www.thestar.com/news/world/2015/09/28/nasa-finds-evidence-of-liquid-water-on-mars.html>
- 7) Wernher von Braun; The Mars Project (1962)
<http://www.wlym.com/archive/oakland/docs/MarsProject.pdf>
- 8) http://www.daviddarling.info/images/ISS_2009.jpg
- 9) <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-19/html/iss019e011464.html>
- 10) <http://pics-about-space.com/international-space-station-bathroom?p=2>
- 11) JAXA, <http://iss.jaxa.jp/spacefood/>
- 12) 日清食品, JAXA <http://iss.jaxa.jp/spacefood/>
- 13) 宇宙農業サロン
- 14) Eigen, M. Steps towards life, A perspective on evolution. Oxford University Press, Oxford, p. 61, (1992) より改変
- 15) 宇宙農業サロン
- 16) https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1090.html
- 17) オデッセイ 原題: The Martian, 20世紀フォックス、(2015)
- 18) <http://www.certifiedorganic.bc.ca/rcbtoa/training/soil-article.html>
- 19) Elliott, E. T. and Coleman, D. C.; Let the soil work for us. -Ecol. Bull. 39: 23-32 (1988) より改変
- 20) 葛飾区郷土と天文の博物館 常設展示
肥やしのチカラ 肥やしのむかしと肥やしのみらい、葛飾区郷土と天文の博物館 (2005)
- 21) 物質の進化 化学総説 No.30, p.18, 学会出版センター (1980) より改変
- 22) J.E. Lovelock ガイアの科学ー地球生命圏、p.79 工作舎 (1984)
- 23) 地球進化論 (岩波講座 地球惑星科学13) 岩波書店 (1998) 図5.16 より改変
- 24) Snowball earth.org <http://www.snowballearth.org/slides/Ch13-2.gif>
- 25) Brook. E; Palaeoclimate: Windows on the greenhouse. Nature. 453,.291-292 (2008)
- 26) Ruddiman, W.E.; How Did Humans First Alter Global Climate?, Scientific American, 292, Issue 3, pp. 46-53, (2005)
- 27) 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」で観測 国立環境研究所
<https://www.nies.go.jp/whatsnew/2016/20161027/20161027.html>
- 28) Geoengineering the climate-Science, governance and uncertainty, The Royal Society (2009)
- 29) 宮原ひろ子 3 太陽活動と地球環境変動 3.3 太陽活動に伴う宇宙線変動と気候変動、J. Plasma Fusion Res, vol. 90, No. 2 122-127 (2014)

- 29) Svensmark, H.. Cosmoclimatology: A New Theory Emerges. *Astronomy & Geophysics*. 48 (1): 1.19. (2007)
<http://www.icr.org/article/new-theory-climate-change/>
- 30) NASA Goddard Center, <http://www.astro-sharp.com/> Figure 2: Line plot of global mean land-ocean temperature index, 1880 to present