地球沙漠と月・火星沙漠の相違点
～火星の表層物質と農業的利用の可能性～

矢沢勇樹・齋藤麻衣子・武田 弘
千葉工業大学

人間が行く月や火星で、どのようにして生態系が成立するのか、さらに植物を含めた生物は本当に共存できるのか、このような疑問を考える前にまずはそのような環境を最初につくることが重要と考えています。実際に月や火星で植物を栽培し、食糧を生産するには与圧したドームが必要となるでしょう。植物に必要な太陽光はそこそこあります。しかし、大気組成が問題になります。そして、植物を育てるには、植物に必要な栄養をどのように管理するのか、さらに人間を含めて地球から輸送する生物に寄生する生物をどうコントロールするか...種の起源や進化を考えると未体験での宇宙生活は決して容易なものではありません。むしろ、人間の他天体への進出はSF映画に登場するような奇怪な生物を誕生させるシーズになるかもしれません。

火星への移住を考えると、火星での大気で最も多いのは二酸化炭素です。現在の火星の条件では、嫌気的な生物はともかくとして、好気的な生物にとっては過酷な環境です。居住環境について水星から火星までの惑星や地球の月の固体部分を比較してみると(図1)、地球でわれわれが生活しているのは、マントルの上にある地殻、さらにその上の土壌層のごく浅い表面部分の環境で制御されています。惑星の表層物質がどのように形成されるかという、表層の下にある地殻から供給された鉱物資源が風化されることによって、さまざまな土壌ができています。

図1 Comparison of solid planets and moon in the solar system

図2 Surface scene of Moon, Earth and Mars

月をみても、火星で撮像された画像をみても、それらの表面は地球の沙漠(=水の少ない不毛の地、砂漠=砂沙漠)と大して変わりません(図2)。そこは生物が住める環境ではないようにみえます。色合いは、月であれば白くて、ニューメキシコのホワイトサンズに似ています。火星の赤い色合いは、ルブ・アル・ハリ砂漠に似ています。火星で岩が散在する風景は、オーストラリアのピナクルス砂漠のようです。ただし、決定的に月や火星が地球と違うことをあげると、地球の沙漠では鉱物としてあったものが、大気や水により、また生物の作用もあるのですが、物質としてどんどん分化してきていること

図3 The evolution of cosmic materials with progress of planetary activities

水があったために、地表面の岩が特定の方向に向いていたりしているところがあります。また微小な部分をみると、通常の水と大気（二酸化炭素）を取りこんだ鉱物・炭酸塩があったり、二酸化硫黄をとりこんだ石膏がみられたりします。またブルーベリーという名前のつけられた小さな球状の物体で、鉄が溶脱したような赤鉄鉱があるのが確認されています。昔の火星には水が豊かにあり、大気中の二酸化炭素や二酸化硫黄がとりこまれた酸性雨がふり、岩石をどんどん溶かしていたのでしょう。そのような風化物が堆積している部位も火星にはあります。

液体の水に加えて、生物の痕跡も火星にあるらしいと唱えられています。南極で発見された火星隕石において、炭酸塩の小さな円盤の周囲に磁鉄鉱の析出がみられます。その析出のしかたは、地球でみられる生物学的な作用による磁鉄鉱の析出と似ています。さらにその隕石の劈開面に微化石様の構造が

图 6 火星上粘土矿物的分布

Figure 4 Composition of the lunar and martian regolith. Data from Taylor (1975) and Brückner *et al.* (2001)

です。分化しきったあとの、砂だけとか、炭酸カルシウムあるいは石膏だけが、ある場所にあつまり、そこでは生物が住めなくなっているところもあります。

しかし、月や火星では、そのような物質進化や分化はほとんど進んでいません(図3)。月については、とくに、進化・分化は皆無に近いのです。大気も水もなく、ほとんど進化していない状態の鉱物にとどまっています。ところが、火星では、若干進化が見られます。鉱物の種類をみると、月の高地に関してはほとんどが斜長石でしめられています(図4)。斜長石が主成分の斜長岩、また暗色の海の部分では玄武岩がほとんどです。

火星では、火星の隕石を分析した結果から、月と同じく、斜長石と玄武岩がおもな成分です。そして、火星では、大気や水と反応した物質が若干確認されています。とくに生物をこれから生産していこうとする上で重要な水については、水の痕跡をしめす峡谷の地形が観測されています。極冠の近くには表面に凍った水がみつけれられたり、表面直下からの中性子のエネルギー分布から極以外の場所でも浅い層に水のあることがわかっています。ただし温度は低いので、水は凍った状態で存在します。

水は鉱物に作用してそれを変成させます。また大気的作用も否定できませんが、水により層状になった地形も確認されています(図5)。むかしに大洪

表 1 Dissolution rate of main minerals (25°C, pH=5)(A.C. Lasaga, 1984)

Mineral	Dissolution rate (mol/m ² /s)	Dissolution time of 1mm ϕ particle (y)
Quartz	4.1×10^{-14}	34,000,000
Muscovite	2.6×10^{-13}	2,700,000
Mg-Olivine	1.2×10^{-12}	600,000
Orthoclase	1.7×10^{-12}	520,000
Albite	1.2×10^{-11}	80,000
Enstatite	1.0×10^{-10}	8,800
Diopside	1.4×10^{-10}	6,800
Nepheline	2.8×10^{-9}	211
Anorthite	5.6×10^{-9}	112

あるといわれたり、有機物である多環芳香族炭化水素がふくまれているのがわかっています。

火星の中で狭い領域（ニリ・フォッサ地域）ではありますが、粘土層の痕跡が見いだされています（図6）。土壌構成成分として粘土は重要な役割をもっています。火星表面の酸化鉱物のバルク組成が測定されており、いくつかの粘土鉱物（モンモリロナイト、ノントロナイト、スメクタイトなど）をまぜると、測定されている酸化鉱物の組成と近い値になります。ただし、これはあくまでも参考値ですが、粘土鉱物の構成比により火星の模擬土壌として使って実験している例もあります。酸化鉱物の組成を、火星と月で比較すると、ケイ酸は同じですが、アルミニウムは月でそこそこ多く、火星では鉄、マグネシウムが多いことがわかります（図4）。ただし、ここで比較しているのは月の高地であり、斜長石が多いことからカルシウムは火星の方が若干少なくなっています。

火星の表面は、およそ玄武岩的な鉱物です。玄武岩をつくるのは斜長石ですが、月にしろ火星にしろ斜長石を多く含む造岩鉱物は多くあります。これは何を意味するかというと、溶液のpHを5とすると、1mmほどの球状の斜長石は100年ほどで溶けてしまいます。これは、鉱物が再構築されるという意味

図 7 Layer structure and climate zone

表 2 Average chemical structure of two fulvic acids

	Ancient seawater	Peat
Averaged Molecular weight (M_n)	810	780
Elemental component (wt%)		
Carbon (C)	48.5	51.5
Hydrogen (H)	5.2	4.5
Oxygen (O, diff)	47.1	43.9
Nitrogen (N)	2.8	0.6
Iodine (I)	2.0	-
Chlorine (Cl)	10.5	-
Average molecular formula	$C_{32}H_{42}O_{23}N_2$	$C_{33}H_{35}O_{21}N_1$

Average molecular structure

● : Carbon
● : Hydrogen
● : Oxygen
● : Nitrogen

合いで、溶けるということで、他の鉱物とくらべると、斜長石の溶解速度は早い造岩鉱物です（表1）。

地球上の各気候帯でどのように風化物が堆積していくかを図7に示しています。表面近くに粘土鉱物の層があり、上部にカオリン、その下に2:1層状珪酸塩鉱物であるスメクタイトの層があります。火星の環境にもっとも近いのは、タイガ・ボドソル地帯であり、降雨量がすくなく、気温が低い地帯です。火星でこれから風化が進行していけば、その地帯の土壌ができていくものと考えられます。

地球上の土壌は、母材、気候、地形、生物、そして時間などの要素因子により様々な様相を示しますが、土壌を形成するときには、産生有機物による風化作用は重要な要素です。生物を育てるには、まず土壌環境を最初につくる必要があります。そ

図 8 Action of fulvic acid in formation of soil

図9 Composition of dissolution rate of plagioclase by acidic solution

のためには、生きた生物とその有機物を火星に持って行くのではなく、地球に産出する優秀な腐植物質であるフルボ酸（表2）を回収して火星表層に供給すると、容易によい土壌ができると考えています。そこでフルボ酸が優れた地球資源であることを実証するために、地球上に豊富にある斜長石を使い、フルボ酸溶液とまぜて、どのようにどのくらいの速度で斜長石が溶けるかを実験的に調べました（図8）。フルボ酸とか腐植物質は、土壌学においてよく知られています。フルボ酸の代表的な推定化学構造をみると、多くのカルボキシル基をもっています。

フルボ酸は地球上の生物や生態系に大きな影響をおよぼしている物質群です。フルボ酸が斜長石を溶かすさまを、塩酸(pH 2)や、乳酸やシュウ酸といった有機酸での溶解と比べてみました（図9）。ケイ素とアルミニウムの酸化物は主要な造岩成分ですが、pH 2の塩酸には、1日で直径1mmの球が消失するほどよく溶けますが、二次生成物として石英が確認されました。有機酸では、その溶液の酸性度が異なるので、カルボキシル基の濃度を同じにして比較しました。シュウ酸ではカルシウム酸化物は溶けてもシュウ酸カルシウムとして再析出してしまいます。フルボ酸では、他の有機酸と比べ構成元素の溶出能が低いものの、一様に溶解していることがわかります。乳酸に関してはケイ素酸化物の溶解能が高く、このことは粘土鉱物をつくるのに重要です。実際にX線回折像から、短時間でカオリナイトができるのがわかり、斜長石から粘土鉱物に変換できることが証明されています（図10）。この過程にはpHの度合、ケイ素酸化物の溶解量、さらに反応温度など様々な作用が関与し、生成する二次鉱物

図10 Formation of clay mineral

に影響を与えます。どのようにこれらを制御したらよいか今後の検討となりますが、一分子に多くの酸性官能基をもつフルボ酸は無機酸や他の有機酸と比べ多段階で解離しながら反応が進行しますので、土壌構成成分で重要である粘土鉱物を生成するには制御しやすい物質と予測されます。

フルボ酸は、強い植物生理活性も示します（図11）。イネの苗にフルボ酸をあたえながら田植えをすると、根の成長が促進され、また茎も太くなります。フルボ酸の成長促進のしくみについては、様々なことが考えられていますが、植物を育てるときに重要なのは、栄養塩のコントロールであり、実は容易なことではありません。イオン交換体としてはたらくカルボキシル基を多くもつフルボ酸は、まず水中にある栄養塩イオンをとりこみ固定します。植物は生長しつつ栄養塩を要求し、酸を放出します。フルボ酸は、植物から放出される酸の分だけ、栄養塩イオンを放出して植物に供給します。すなわち植物の成長に合わせて、それに応じた適正な量の栄養塩を植物に供給する機能をフルボ酸はもっています。

実験で微生物を培養するときには、pHを適正な範囲に維持するためにpH緩衝液を培地に加えます。ところで、フルボ酸は高いpH緩衝能を有します（図12）。生物にとっても、この緩衝機能は重要です。つまり、生物が自分で出した酸で自分自身が攻撃されて死ぬということを防ぐことができます。また、地球上での沙漠化土壌の修復に腐植物質は大きなはたらきを示します。例えば、アルカリ・塩害をひき起こしやすい土壌は粘土質であるので排水性・通気性が悪く、毛管作用によりナトリウムが表層に蓄積してさらに排水性が悪くなります。土壌の排水性が悪くなったアルカリ性土壌に腐植物質を

図 11 Physiological effects of fulvic acid

まぜると、ナトリウムが溶脱して根圏域の性状を改良することができます (図 13)。逆に、酸性アルミニウム害をひき起こしやすい土壌は砂質であるので排水性・通気性は高いのですが、イオン交換能や pH 緩衝能に乏しく、さらに保水性が低いので易溶性塩が溶脱されます。結果、鉍物中のアルミニウムが溶解し、アルミニウム毒により穀物の根の伸長を停止させてしまいます。塩酸などの無機酸は酸性度が高い分、斜長石の溶解性に優れているのですが (図 9)、アルミニウム毒による植物生長阻害をひき起こす可能性が大いに考えられます。このような土壌に対しても腐植物質はアルミニウム毒を緩和する作用もみられ、結果、栄養を吸収する根の成長が衰えないという効果が証明されています (図 14)。

フルボ酸を用いて斜長石から粘土鉍物をつくりませんが、さらにつくられた粘土鉍物と腐植物質の複合効果として、粒の凝集が起こります。粒の凝集が

図 12 pH buffering curves of acid-affected arable soil and humified organic materials

図 13 Influence of humified organic materials on alkaline salts content in rice field after harvesting

複雑な幾何学的形状になるにつれ、団粒構造ができます (図 15)。このようにしてできる団粒は、酸素をこのむ好気性菌と、このまない嫌気性菌の双方を凝集的に共存させて、双方の長所を発揮させます (図 16)。例えば、腐植物質を生成するには、粗大有機物を分解する好気性菌、その分解物を重縮合させる嫌気性菌が必要となり、土壌環境が著しく好気環境になると有機物の蓄積は低く、むしろ二酸化炭素として分解されます。逆に嫌気環境になると腐敗ガスを発生します。窒素固定の場合にも同様に窒素固定菌は酸素を利用して呼吸しますが、窒素固定を行うには酸素は不要となります。このように土壌中の生態系をコントロールして、有効活用するにはスーパーコンピューターでも難解な方程式 (つまり土壌環境) を付与してあげる必要があります。団粒構造を即つくりたいのであれば、植物バイオマスから生成した炭化物も一つの方法と考えます。この炭化物には植物組織を維持した幾何学的形状をもっており、かつ炭素の塊ですからダイヤモンドほどではありませんが極めて安定しています。われわれは、日本古代から行われている炭農法を改めて

図 14 Comparison of wheat growth for Al-treated soils with lime and humified organic materials

図 15 Aggregated fraction in humic acid adsorbed on Na-, Ca-artificial soils

見なおし、土壌生物との親和性の高い炭化物の生成も試んでいます。

最後に、火星の表層物質である斜長石を多く含む玄武岩の資源的利用価値として (図 17)、今回の講演題目である農業的利用のほかに、発電用の電子素子、酸素ガス生成原料、そして建築資材としての利用に期待されます。地球の沙漠とあきらかに異なっているのは、物質資源の分化が月や火星の沙漠はほとんど進行していない点でしょう。他天体への移住計画において真剣に考えなければならないのは、人間の手でもう一つの地球沙漠 (不毛な地) を作ってはならないこと、そして、根本的な素過程を理解するなかでわれわれの生命体惑星の地球をどう維持していくかでしょう。

図 16 Function of soil aggregate

図 17 Strategy of soil formation on Mars

Variation between Terrestrial and Lunar or Martian Desert - Surface Materials on Mars and its Possible Use for Agriculture

Yuuki Yazawa[†], Maiko Saito, and Hiroshi Takeda
Chiba Institute of Technology

Abstract

In order to evaluate feasibility of synthesizing ecological system on Moon and Mars for sustaining human life there, it is required to prepare environment, which enables to support photosynthetic activity of plants. Surface materials, crust over mantle and thin soil layer, are important factor for life. Evolution of surface materials, including weathering of minerals, is compared between Earth, Moon and Mars.

[†]To whom correspondence should be addressed:

Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan
E-mail: yuuki.yazawa@it-chiba.ac.jp