

宇宙空間と太陽系惑星環境

Interplanetary Space and Planetary Environment

鶴 田 浩一郎 (つるだ こういちろう)

宇宙科学研究所 教授 惑星研究系惑星大気計測学部門

紙の上に半径 6 cm 程度の円をコンパスで描いてみたとする。これを地球だと考える。地球の半径は 6 378 km。エベレスト山も日本海溝も、これまで地殻を探る目的で掘った一番深い穴も 0.1 mm の幅に納まってしまう。ずっと上空まで広がっていると考えている空気層すらも 0.3 mm の鉛筆の線の幅にはいってしまう。こうやって円を描いて眺めていると、我々のよく知っている世界がいかに狭い範囲に限られているかということが実感としてせまってくる。「井の中の蛙」にならない最良の方法は井戸から飛び出すことである。幸いにして、今、我々は井戸の中から飛び出す手段を手にすることができた。これまでに、わずかばかり垣間見た井戸の外は、想像以上に多様でダイナミックな世界のようなのである。

1. 太陽とその勢力圏

口絵写真—1 は我が国の衛星「ようこう」が X 線で撮影した太陽の写真である。普段見慣れた太陽とは随分と趣を異にしておどろおどろしい姿を見せている。我々が見ている太陽は地球の大気層を通過できる可視光線で見える太陽である。X 線は大気層を通過できないので大気の外に出ることによって、はじめて口絵写真—1 のような太陽を見ることが出来る。光球の温度は 5 500℃ 程度であるがその外に広がる太陽大気（コロナ）の温度は 100 万度にも達し、写真に見られるように X 線を放出する。今世紀半ばの 1958 年に英国の科学者 E. N. Parker (パーカー) は太陽大気の平衡について大胆な説を提唱した。それによると、地球の大気のように高度とともに指数関数的に大気密度が減少する、いわゆる静水圧平衡となる解とは別に、太陽からの距離とともに速度が上昇し、ある一定の超音速流となった後は、そのまま無限の彼方へ流れ去る解があることを示した。それまでも、太陽から光以外に何か粒子線が出ていることは、彗星の尾の観測や太陽面現象と地球の磁気嵐等の関係から想像されていたが、Parker の考えを実証するにはその後 4 年ほど待たなければならなかった。1962 年に金星に向けて飛行中の米国の探査機マリナー 2 号によって太陽風の存在は実証されることとなった。

太陽風の発見は太陽系の空間（惑星間空間）に関する認識を一変させた。それまで、時折、太陽面の爆発現象に伴って高いエネルギーの荷電粒子が通り過ぎる以外は、何事も起こらない。ただの真空と考えられていた空間は、秒速 400 km のプラズマが常時流れている空間に変わった。プラズマは荷電粒子のガスからなる気体のことであ

るが、その高い電気伝導度のために、普通のガスにはない性質をいろいろ持っていて、物質の第 4 の状態であると考えられる人もいる。プラズマの重要な性質の一つに磁場を凍結して運ぶ性質がある。電気伝導度が高いために現れる性質で、超伝導コイルが磁場を永久に保持するのと同じ性質である。このため、太陽風は太陽の磁場を凍結して惑星間空間に運びだしている。太陽風の組成はプロトン（水素の原子核）と電子であり、密度は 1 cm³ 当たり 5 個程度である。地上の常識からすると随分少ないようであるが、ほかに何もない空間では光に次いで大きなエネルギーの運び屋が太陽風である。ちなみに、地球が太陽風から受け取っているエネルギーは 10⁹ kW 程度であり、オーロラ等のエネルギー源となっている。

太陽風は海王星を通り過ぎて更に遠くまで到達していることが米国の探査機ボイジャーによって確かめられている。太陽風の吹くところを太陽の勢力圏（太陽圏）とすると、太陽圏の大きさはどのくらいあるのだろうか。現在の考えでは、星間ガスとの荷電交換により太陽風がプラズマとしての性質を失うところが太陽圏の境界であろうと思われる。代表的な値としては太陽から約 100 天文単位^{注1}あたりに境界があると推定されている。

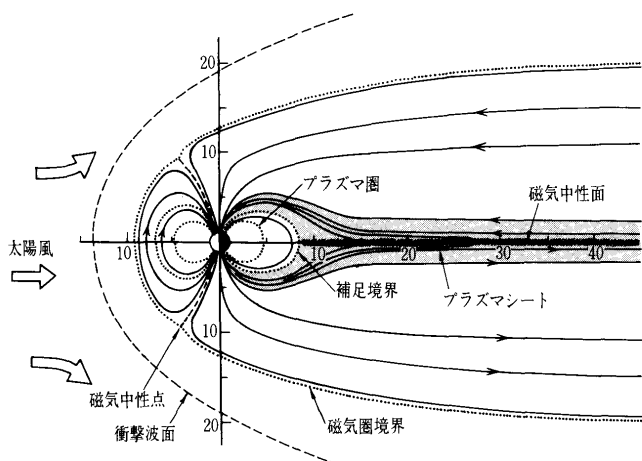
2. 地球の領分—磁気圏

太陽風は地球にどのような影響を与えているのだろうか。地球に磁場が無ければ太陽風は地球の大気層まで到達し、大気層に直接影響を及ぼすだろう。たまたま地球はかなり強い磁場を持っている。プロトンと電子からなる太陽風はこの磁場に妨げられて地球の近くにやってくることはできない。丁度、磁場のバリエーションができていくようなものである。このバリエーションの中を磁気圏と呼び、ここまでを地球の勢力圏と考えている。磁気圏の大きさや形は第 0 近似として、太陽風との圧力平衡で決まると考えてよい。プラズマでは磁場は圧力として表現できる。太陽風の吹き付ける前面では太陽風の動圧と地球磁場の圧力（双極子磁場だと圧力は距離の 6 乗で減少する）で距離は定まる。計算によるとこの距離はほぼ地球の中心から約 6 万 km あたりになる。実際の磁気圏の形と大きさは前面ではこの推定と良く合ったが、下流側では全く合わなかった。磁気圏の夜側は閉じることなく長く伸びた尾を形成していることが分かった。米国の Ness (ネス) の率いるグループの発見であるが、磁気圏の尾の間

注1 天文単位：太陽系内の距離の単位。1 天文単位は太陽と地球との平均距離で、14 960 万 km。(広辞苑)

説 經

題はその後40年近くなる現在まで磁気圏物理学者を悩ましつづけている問題となった。図-1に現在考えられている磁気圏の構造を示す。



図一 1 磁気圏の構造。磁気圏の尾は地球の半径 (6 378 km) を単位として約1 000倍程度まで伸びているようである。

磁気圏の中にいる我々は太陽風の影響を受けないかという、これはむしろ逆である。先にバリヤーという言葉を使ったが、バリヤーというには大変不完全で磁気圏は太陽風のエネルギーの10%程度を取り込んでいるらしい。太陽風に面した磁気圏の断面積は地球そのものの面積の400倍ほどである。取り込んだエネルギーの10%が大気層で消費されるとしても地球がもともと受ける太陽風のエネルギーの40倍のエネルギーを地球は受け取ることになる。大気層での太陽風エネルギー消費の最も華やかな姿はオーロラである。オーロラは磁気圏の尾に蓄えられた太陽風エネルギーの間欠的な放出と考えられている（口絵写真-2）。

磁気圏は宇宙探査を行おうとする我々に厄介な問題を与えてくれる。宇宙時代の幕明けに Van Allen (ヴァンアレン) が見つけ、彼の名を冠して呼ばれることもある放射線帯の存在である。地表から高度4 000 km, 磁気赤道を中心に分布する放射線帯の強度は非常に強く電子機器に様々な障害を引き起こす。放射線帯の粒子の源は大きく二つに分けられる。一つは宇宙のかなたから飛び込んできた宇宙線が大気層で核反応を起こし、その時生成される中性子が磁気圏内で崩壊し磁場に補足された成分であり、もう一つは太陽風のエネルギーを得て磁気圏が内部で作り出した高エネルギー粒子である。放射線帯が補足できる粒子のエネルギーは惑星の磁場に比例すると考えられる。地球の10倍も大きな磁場を持つ木星の磁気圏には地球よりはるかに強い放射線帯があることがわかっている。木星の磁気圏深く探査機を送ることが難しい原因の一つでもある。

3. 双子の惑星—金星

太陽風と地球の磁気圏を見てきたので、気分を変えて、お隣の惑星、金星に話題を移したいとおもう。太陽系には表一に示した9個の惑星がある。この表からわかる

ように水星から始まって火星までの内側の4個の惑星は比重が大きく比較的小振りである。木星以遠の惑星は比重が小さく冥王星を除くと皆大型である。前者を地球型惑星、後者を木星型惑星と呼ぶ。この違いは45億年前の惑星誕生のストーリーで説明が試みられている。地球型惑星の中でも金星と地球は太陽からの距離、大きさ、比重ともに非常に近い値を持っている。いろいろな条件が似通っているから、この二つの惑星は誕生以来、同じ様な進化の道筋を辿って現在に至ったのではないかと考えたくなる。地球と比較研究する上で格好の惑星というわけである。金星は宵の明星、明けの明星として知られている最も明るく見える惑星である。地球に近いせいもあるが、もう一つの理由は金星が全面、厚い雲に覆われているせいである。雲の反射率は75%もあり、金星を一層明るく輝かせている。厚い雲は金星の地表を我々の目から隠し、金星の世界は長い間謎に包まれていた。ボールが少しずつはがれて、想像を絶する世界が見えてきたのは1950年代の終わり頃からである。

表一 1 太陽系の惑星（地球を 1 として比較）

名前	太陽からの 平均距離	半径	質量	比重	大気組成
水星	0.39	0.38	0.06	5.4	希薄なナトリウム
金星	0.72	0.95	0.82	5.3	90気圧, 炭酸ガス
地球	1.00	1.00	1.00	5.5	1気圧, 窒素, 酸素
火星	1.52	0.53	0.11	3.9	0.06気圧, 炭酸ガス
木星	5.20	11.2	318	1.3	水素, ヘリウム, メタン
土星	9.55	9.5	95	0.7	水素, ヘリウム, メタン
天王星	19.22	4.1	15	1.2	水素, ヘリウム, メタン
海王星	30.12	3.9	17	1.7	水素, ヘリウム, メタン
冥王星	39.44	0.19	0.002	1.7	メタン?

対象に触れずに温度を計る方法として、対象物からの赤外線放射強度を計る方法はサーモグラフィー等として実用化されており、現在ではよく知られた方法である。同じことは電波を使っても実現できる。金星にアンテナを向けた電波天文学者は金星から異常に強い放射が出ていることを見出した。温度に換算すると絶対温度で600°K以上になり、それまでの常識と大幅に食い違っていた。それまでは、金星は軌道が太陽に近いにもかかわらず、雲の反射率のために温度は地球に比べてせいぜい10数℃高いだけであろうと考えられていたからである。この常識は1962年、先に述べたマリナー2号が金星をフライバイ（そばを通過）することで、あっさり敗れ去った。やはり、金星は熱かったのである。

電波による観測は金星に関してもう一つ大きな得点を上げた。それまで雲に隠れて分からなかった金星の自転周期が何と243日であること、しかも地球とは逆向きに自転していることを見い出した。ペールがはがれていくに従って地球との違いの大きさが浮き彫りにされてきた。その後、金星には米国、旧ソ連邦合わせて20機以上の探査機が送られた（口絵写真一4）。中でも、金星に磁場が無いことを証明したマリナー5号（1965年）、初めて

金星大気のデータを送ってきたベネラ4号(1967年), 初めて金星表面のデータを送ってきたベネラ7号(1970年), 長期間のデータを系統的に取得したPVO(1978年), 詳細な電波によるマッピングを行った最近のマゼラン(1989年)が印象的である(口絵写真—3, 4)。

金星の大気の主成分は炭酸ガスであり, 地表面で約90気圧に達する。地球でいえば900mの海底と同じ圧力である。炭酸ガスはいわゆる温室効果ガスであり, 可視光を通し, 赤外線を遮断する性質をもっている。炭酸ガス大気の温室効果によって金星の地表は約500℃の高温になっている。金星の地表から50kmくらい上昇すると気圧は略地球の地上気圧程度になる。このあたりには厚い硫酸の霧がたちこめている。また, 不思議なことにこのあたりの大気は4日周期で金星を1巡するいわゆる「4日循環」と呼ばれる運動をしている。可視光線ではただ白く見える雲も紫外線の目で見るとその中にくさび型の模様が見える。この雲の運動を追跡して大気の運動を調べた結果である。自転の遅い金星にそれより60倍も早い大気の運動がなぜ起きるのか, これも金星の持つなぞの一つである。

金星の大気にはほとんど水が存在しない。惑星形成時には地球と同じ様に水を取り込んでいたと考えられるから, その後の何らかの作用で水が逃げてしまったと考えるのが自然である。水が惑星の大気層から逃げ出す場合, 上空に到達した水分子は太陽の紫外線によって分解され水素と酸素に分かれる。水素は軽いため惑星の重力を振り切って容易に宇宙空間に逃げるができる。水のなかには一定の割合で水素の代わりに水素の同位体である重水素が混じっている。重水素は水素の2倍の重さがあるため水素より若干宇宙空間に逃げる割合が小さくなる。水素と重水素の比率を調べると, これまでにどの程度の水が無くなったかを推定することができる。金星と地球について重水素と水素の比率を比較してみると, 金星の方が約100倍ほど高い値を示す。このことは, 金星の方が地球よりはるかに多量に水をこれまでに失ったことを示している。金星大気から水が失われた過程を説明するおもしろい考えがある。暴走的温室効果と呼ばれる考えで, 以下に概略を紹介する。

惑星表面から蒸発した水蒸気は上昇するにつれて断熱膨張のため温度が下がっていく。上空の温度が十分低いと, 水蒸気は再び水となって地上に戻ってくる。地球では対流圏の上部でこの条件が満たされ水がそれより上層に運ばれるのを妨げている。もし, 上空の大気の温度が高ければ水蒸気はそのまま上空に拡散していく。水蒸気は炭酸ガス同様温室効果が大きい気体であるから水蒸気を多量に含んだ大気の温度は更に上昇し, 地上の水は更に蒸発し, 大気の温度は更に上昇する。この悪循環は結局地上の水が無くなるまで続くであろう。この循環を暴走的温室効果という。金星ではこのような機構が働いて水が失われ, 灼熱の世界ができてしまったと考えられている。

4. 火 星

表—1を見ると, 火星は地球の外側を回っている大きさが地球の半分ほどの惑星であることがわかる。同じ地球型惑星の仲間であるが比重がやや小さい。比重や大きさの違いを別にして, 地表面の環境を見ると, 現在でも火星は金星よりはるかに地球に近い様相を呈している。時代を40億年ほど遡ると更に地球に近い環境であったのではないかと考えられている。

火星大気の主成分は金星と同じく炭酸ガスである。大気の量は大変少なく地上気圧で比較すると地球の100分の1以下の0.006気圧程度, 丁度ジャンボ機が飛行する成層圏の気圧に相当する。この気圧では液体の水は存在できない。丁度ドライアイスがそうであるように, 気温が0℃を切ると水蒸気は氷となり, 0℃を越えると気化して水蒸気となる。したがって, 現在の火星の地表に液体状の水は存在しない。大気が薄く, 温度変化を緩やかにする作用を持った水が無いために火星の表面の温度は夜と昼で大きく異なる。日中の気温は-30℃程度, 太陽に直接暖められる地面は0℃近辺まで上昇するが, 夜になると-100℃程度になる。

火星にも季節がある。冬になると極を中心に白い堆積物に覆われる領域が広がるのが観察される。白い堆積物(極冠)は地球の雪と異なって炭酸ガスが凍ってできるドライアイスであると考えられている。極冠の一部は夏になって季節的に消長する部分が消えた後にも残っている。特に, 北半球の極冠は大きく, 差し渡し1000km以上の大きさのまま夏にも存在する。探査機から測定したこの部分の温度は絶対温度で200°K以上あり, 炭酸ガスの氷(ドライアイス)が安定に存在できない値を示している。水の氷からできていると推論される理由である。極冠のドライアイスや水の氷は火星大気の大きな備蓄場になっている。大気の温度が上昇すると極冠の氷が気化して大気となり, 気温が下がると大気は凝結して極冠が増大する。特に, 南半球の夏に特異的に発生する大砂嵐は火星全面を覆いつくし, 静まるまでに3か月もかかるすさまじいものである。砂嵐の最中は太陽の光は大気中のちに吸収されて地表にはわずかししか届かなくなる。ちりが吸収した太陽熱で大気は暖まり極冠からの炭酸ガスの供給も増えて大気量は25%近くも増加することがある。大きな台風の目の中でさえ気圧変動が高々数%である地球とは大違いである。

現在の火星大気の様子は上に述べたとおりで, 我々にとってあまり快適なものではない。この節の冒頭でも述べたように, 約40億年前の火星はこのように索漠たる世界ではなかったと考えられている。その大きな根拠は「流体が表面を流れた」跡と思える地形が多数見い出されるからである。現在も極冠に水が存在する火星で流体を水と考えるのは自然であろう。

昔の大気の状態を推しはかる有力な手だては, 金星で重水素と水素の比が有効であったように, 同位体比を測定することである。火星大気中の窒素の同位体比を調べ

総 説

ると重い同位体が濃縮されていることがわかる。同位体比から推定した「昔の」火星大気は地表面で1～2気圧に達し十分な量の水を含むものである。炭酸ガス大気の温室効果で気温も0℃以上に上がり、地表面に水の流れを作ることが可能であったと推定されている。このような大気と水があれば、地球と同じ様に生命が発祥し、地球と同じ様な筋道を辿ることも可能ではなかったかと考えたくなる。なぜ火星は地球のような道筋を辿らなかったのだろうか。一つの仮説は、金星の項で述べた暴走的温室効果と逆の悪循環が働いたというものである。温暖な気候のもとで地表面に現れた水は大気中の炭酸ガスを溶かしこみ、更に岩石と作用して炭酸塩として固定することで大気中の炭酸ガスを徐々に減らしていった。その結果、温室効果が減少して大気温度が下がり、大気中の水蒸気量が減少し、更に温度を下げて、という悪循環の結果温度が下がりすぎてしまったという考えである。暴走的温室効果の反対という意味で暴走的冷凍機効果と呼ぶ人もいる。

地球上の最古の生命の痕跡は35億年の地層から見ついている。地殻運動の激しい地球上で更に古い地層から生命を見出すことは容易ではないが、更に数億年遡った時代に生命が発生していなかったとは必ずしもいえない。もし、地球上で40億年前に生命が発生していたならば、当時、同じ様な状況にあった火星でも生命の発祥はあったかもしれない。火星では、不運にして生命が大気環境を変える前に環境の方が早く変わったため生まれかけの生命が死滅してしまったとも考えられる。現在の火星表面に生命活動が存続しているとは考えにくい、極冠の氷、あるいは地下の凍土の中に生命の痕跡が残っているかもしれない。

5. 地球の大気

金星と火星の大気と比べると地球の大気は全く異質である。火星や金星の主要な大気成分である炭酸ガスは最近増加の傾向にあるとはいえ0.03%程度であり、代わりに、金星や火星ではマイナーな成分であった窒素と酸素がそれぞれ78%と21%を占めている。地球も出発点では金星や火星と大差無い大気構成であったと考えるのが理にかなっている。その傍証の一つとして、海底の炭酸塩がすべて分解して炭酸ガスとなったとすると、炭酸ガスの大気は地表面で70気圧になるという推定がある。これは金星の90気圧と大差無い量である。地球では炭酸ガスは水と生物の作用で徐々に大気から取り除かれ、代わりに酸素が加わって現在の大气組成ができ上がったと考えられている。生命自身が大気環境を変えてきたともいえる。

高等な生物が生まれるまでには約40億年を要している。このように長い期間にわたって大気が暴走的に暖まった

り冷えこんだりしないためには太陽からの熱入力がある範囲にならなければならないだろう。この条件を満たす領域は太陽からの距離がある範囲に納まっている必要がある。Hart (ハート, 1978) はこの領域のことを連続生存域 (Continuously habitable zone, CHZ) と名付け計算してみた。その結果、地球の軌道が5%ほど太陽に近かったとしたら地球の大気は金星のようになり、地球の軌道が今より1%程、火星寄りであれば地球の大気は火星的になってしまい、現在のような生命の繁栄は無かったという結論を得た。地球上で現在見られる生命の繁栄は太陽系形成時の幾つかの僥倖によるもののようである。

6. 終わりに向けて—我が国の惑星探査

冒頭に描いた円から飛び出して見た外の世界は線の中の世界とは随分と違った世界である。この多様な世界を取り込んで新たな世界像を作り上げていくことがこれからの仕事であろう。外の世界はまだほんのわずか垣間見ただけである。幸いにして、外の世界を探索する手段を我が国の科学者も手にすることができるようになった。地球周辺の空間については既に10年ほど前から世界に伍して一流の探査機を送ることができるようになっている。月や更に遠い惑星の探査もM-V型ロケットやH-2ロケットの開発によって間もなく実現しようとしている。1997年にはM-Vによって月探査機LUNAR-Aが打ち上げられる。この探査機は月の内部構造を調べるために3個の地震計を月面の3箇所に設置する。軌道から地震計を搭載したペネトレーターと称する小型のプロープを投下するもので、世界でも初めての試みである。翌1998年には火星探査機PLANET-Bが同じくM-Vで打ち上げられる。約1年の航海を経て火星到着は1999年である。PLANET-Bは火星の磁場をはかると同時に太陽風によって火星大気がどのような影響を受けているかを調べることになっている。PLANET-Bに続いて、太陽系の起源と関係の深い始源天体の一つである小惑星のサンプルを持ち帰ろうという勇壮な計画も検討が進められている。これから2000年初頭にかけて我が国の探査機も外の世界の探索に大いに活躍することが期待される。

参 考 文 献

- 1) Hart, M. H.: The evolution of the atmosphere of the Earth, *Icarus*, 33, pp. 23~39, 1978.
- 2) Kasting J. F. and O. B. Toon: Climate Evolution on the Terrestrial Planets, in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmosphere*, ed. by S. K. Atreya et al., The University of Arizona Press, 1989.

(原稿受理 1995.9.25)