

木星系の生物学

木星系は様々な意味で太陽系全体の縮図である。木星は（木星系の）中心に位置し、太陽と似た組成をもった巨大ガス惑星である（図 13.1）。木星は自身が太陽から受け取るよりも多くのエネルギーを周囲に放射しており、エネルギーの源であるという意味で太陽のようである。しかし、太陽とは違って木星は核融合によってそのエネルギーを発生させているわけではない。むしろ、惑星が重力収縮して冷えるときに熱エネルギーが放出されるのである。その一方で、太陽に似て、多くの惑星のような天体が重力によって束縛されて（木星を）取り巻いている。木星の場合は、惑星の周りを回っているのだからこれらの天体は月である。最も大きい4つの衛星はイオ、エウロパ、ガニメデ、カリストであり、これらは発見者ガリレオにちなんでガリレオ衛星と呼ばれる。イオはの中で木星に最も近く、カリストは最も遠い。それらは共にミニ太陽系を作っている。

[図 13.1] ボイジャーによる写真。背景は木星で、前面には衛星イオとエウロパ。イオは左側の大赤斑の前にある。（NASA 写真）

イオとエウロパは共に大きさが地球の月に似ている。イオの半径は 1850km、エウロパは 1569km、月は 1738km である。ガニメデとカリストは共に大きさが土星の衛星であるタイタンに近い。ガニメデの半径は 2631km、カリストは 2400km、タイタンは 2575km である。

これらの天体を詳細に見るまでは、木星系内のどこにでも生命が存在する可能性があるということは驚くべきことであるように思われるかもしれない。しかし、これらの天体は非常に注目する価値がある。イオは地球型惑星にはない熱源を持っている。それは他の衛星や木星との相互作用によって生じる潮汐加熱である。結果として、活発な火山活動や生命の活力となる熱源が存在し、イオには水が残されていないであろう。エウロパでは潮汐加熱は（イオよりも）小さく、（エウロパ）表面では明らかな火山活動はないが、かなりの量の水が存在する。水は表面に氷として存在し、比較的浅いところには液体の水の大きなリザーバが存在できる。ガニメデとカリストには僅かな潮汐加熱しか存在せず、非常に多量の水氷が存在するにもかかわらず液体の水はありそうもない。

そして、当然ながら（生命のいる可能性がある場所として）木星がある。木星には人間の目で見ることのできる高度に比較的涼しい大気があるが、もっと暖かい大気が内部の深いところにある。有機分子は大気中に存在し、液体の水はおそらく雲の中に存在する。生命も大気中に存在するだろうか？

まとめ

- 木星系は太陽系の縮図である。
- ガリレオ衛星（イオ・エウロパ・ガニメデ・カリスト）は木星の衛星で最も大きいものの4つである。
- 木星系には生命がないように思えるが、生命が存在する可能性は大いにある。
- イオやエウロパには潮汐による熱源がある。

- エウロパには液体の水が存在する。
- ガニメデ、カリストには液体の水はありそうもない。
- 木星には暖かい大気があり、雲中に生命の元となる分子も存在するので、生命がいるかもしれない。

ガリレオ衛星 - 水氷、液体の水、潮汐加熱

ガリレオ衛星についての議論始めるために、それらの密度と潮汐加熱によってエネルギーを得るメカニズムについて述べよう。タイタンの時と同様に、これらの衛星の平均密度からどの程度の水氷が存在し、珪酸塩（シリケート）に混ざっているかがわかる。各衛星の半径はボイジャー探査機による画像を用いて測られ、質量は探査機が側を通ったときの軌道ずれから導かれた。質量と体積の比から平均密度が得られる。更に、ガリレオミッションによる結果から衛星内部についての新しい情報がいくつか得られる。

イオの密度 (3.55 g/cm^3) は月 (3.34 g/cm^3) にとても似ている。イオの密度が月と似ているということから、その組成も似ていると考えられる。もし、イオが月のような物質でできているとすると氷はあまり含まれないということになる。イオはほんの少しだけ月よりも密度が高いため、月よりも少しだけ鉄に富んでいるかもしれない。鉄は珪酸塩岩よりも密度が高いため、(鉄があると)平均密度を大きくできる。もし、月が鉄の核を持っているとしても、それはとても小さくなくてはならず、月全体の質量や密度にはほとんど寄与しない。ガリレオ探査機によるイオの重力場観測の最近の解析によるとイオは表面より中心の方が密度が高いことが示唆されている。これは核が存在することを支持している。もちろん、鉄を含むことで増加した密度が氷を含むことで減少した密度によってバランスするかどうかを知る術はない¹⁾。イオは密度の高い核と同時にいくらかの氷を含んでいる可能性があり、そうであっても観測された密度でありうる。しかし、表面に水氷があることや大気中に水蒸気（もしくはその副産物である酸素や水素）があるという証拠はない。

エウロパの平均密度はおよそ 3.01 g/cm^3 である。もしエウロパが珪酸塩鉱物でできた典型的な岩石物質で構成されているとすると、この密度であるためにはエウロパの質量のおよそ 10-15% が氷でできているということになる。エウロパは太陽からの距離が 5.2 AU であり、temperatures are warm enough that water is the only ice that is expected to be present; 他の氷は比較的早く宇宙空間へ昇華し、これらの比較的高い温度では決して凝結できないであろう。エウロパの表面は反射率が高く、反射した日光の波長の性質から表面が完全に純粋な水氷で構成されていると考えられる。だが、純粋な氷よりも少し黒くなっている領域があり、'汚れ (dirty)' が見られるので、(氷には)いくらかの不純物 (contaminating debris) が混ざっているに違いない。ガリレオ探査機による観測からエウロパはより密度の高い物質でできた中心核を持っていると示唆される。結果として、平均密度が観測されるものとなるためには水氷の存在度は 15% を少し超える程度必要である。

ガニメデとカリストはガリレオ衛星の中で最も大きい 2 つであり、木星から最も遠い。密度は共に 2.00 g/cm^3 よりも低い。ガニメデは 1.93 で、カリストは 1.83 である。タイタ

¹⁾there is no way to know whether an increased density from having additional iron could be balanced by a decreased density from having some ice

ンのように、これらの値は純粋な珪酸塩であった場合に期待されるよりもずっと低く、かなりの量の水が混ざっている必要がある。ガニメデの密度からその質量の 50 から 57% は氷でなくてはならず、カリストは 52 から 58% は氷でなくてはならない。これら 2 つの衛星とエウロパの氷の存在度を正確に決められないのは衛星内の氷の分布が不確定であるからである。氷の密度は圧力に依存するので正確な氷の存在度は、氷が全て表面にあるのか、それともいくらかは深くに埋まっているのかで異なる。また、いくらかの水は珪酸塩鉱物と結合して水和鉱物 (hydrate minerals) を形成できる。これらは無水珪酸塩よりも密度が低く、混合物として純粋な氷がなくても全体の密度を下げることに寄与するだろう。

2 つの衛星イオとエウロパにおいて (可能な) 生物学的観点で興味深いことは潮汐加熱によってそれらの内部に熱が加えられることである。イオの潮汐加熱は地球が月によって潮汐を起こすのと似ている。この (地球の) 場合、月の重力が地球の海を引っ張る。結果として、水は海を通過して月の直下の点に向かって流れ、そこに (水が) 溜まって厚くなる (月の引力と地球の回転 (遠心力) の差によって地球の反対側も同様のことが起こる)。地球がその軸の周りを 1 日に 1 回転するので、我々は 1 日に 2 回海の高さが上がったたり下がったりするのを見ることになる。大陸や水自身による摩擦によって水の動きは止められ、この過程で水が動くエネルギーが散逸する。地球上ではこの摩擦によって解放される熱の量は無視でき (るほど小さく) よって、表面温度が目に見えて上昇するのを見ることはない。

イオでは潮汐はイオが木星の周りを回る動きによって生じる。軌道は正確には円ではないので、イオはそれぞれの軌道で異なる時間に木星に近づいたり遠ざかったりする。行ったり来たりするにつれて、木星による引力が少しだけ変化し、それによってイオの形が歪む。更に、軌道は正確に円ではないがイオはそれ自身の軸を一定の割合で回転するので、イオは木星の表面から見ると少しだけよめくようになる。よめくうちに、木星に最も近いイオの表面上の位置がすこしだけ変化する。木星の引力によってイオが引きつけられ変形するので、このよめきによって周回毎に少しだけ異なる変形を起こす。クリップをすばやく折り曲げたり伸ばしたりすると、摩擦によってクリップが熱くなるのと同じように、イオの形が周回毎に歪むことでエネルギーを散逸しイオが熱くなる。この摩擦による潮汐エネルギーの散逸はイオの内部に十分な熱を与え、内部のほとんど、もしくは全てが融点まで加熱され、イオ表面で活発な火山活動が起こる。また、実際イオ全表面で火山活動が見られる。活動中の火山プルームがボイジャーやガリレオ探査機によって撮影されており、溶岩の湖と火成作用による地形がイオ表面に見られる (図 13.2)。

[図 13.2] ボイジャー探査機によって撮影されたイオ表面の画像。この画像に見られる全てのものは火山過程によって形成された。異なるタイプの噴火は表面に異なる特徴を残す。(NASA 写真)

熱としてイオ²⁾内部に解放されるエネルギーの源はいろいろなところにある。例えば、地球で散逸する月による潮汐エネルギーは実際には地球の回転と月の軌道でのエネルギーが起源である。熱が解放されるにつれて地球の回転は遅くなっていき、月は遠ざかっていく。過去には月はもっと地球の近くにあったし、地球の自転はもっともっと速かった。400 万年前には月は地球から数千 km しか離れていなかったし、地球の 1 日はたった 5 時間程

²⁾ 「地球」の誤植と思われる

度だった。イオではエネルギーの起源はイオ自身の軌道である。エネルギーが散逸するにつれ、木星を回るその軌道は急速に円になるはずである。もし、軌道が円ならばイオの形はその軌道を回る間に変化せず、潮汐散逸や潮汐加熱は起こらなくなるであろう。しかし、すぐ側のエウロパがイオを引っ張りイオの軌道離心率（軌道が楕円である度合い）を大きくするので軌道は円にはならない。これはブランコに乗った子供を揺れる度に押して揺れを大きくするのと同じようにして起こる。イオとエウロパは共鳴が固定していて決まった時間間隔でエウロパがイオを引っ張っている（p213,17）。結果として、エネルギーの起源のいくらかはエウロパの軌道にもある。ガニメデもこの小さな揺れの一因を担っていてエウロパの軌道を押している。カリストだけはこのゲームには参加していない。

このエネルギー散逸の理論モデルは非常に多くのエネルギーがイオ内部へ散逸することを示す。この大きな加熱は内部を温めるであろうし、いくらかの熱は表面への熱伝導や表面の火山噴火からの熱放射によって失われるであろう。また、イオの内部ほどではないが、エウロパの内部でも加熱が存在する。

まとめ

- 衛星の平均密度から水氷が珪酸塩にどれだけ混ざっているかがわかる。
- 衛星の半径と質量から平均密度がわかる。半径と質量は探査機による観測より得る。
- イオは月と同じ位の密度（ 3.55 g/cm^3 ）で、組成が似ていると考えられる。その場合、イオには氷があまり含まれないことになる。
- イオ表面や大気中には水がある証拠はない。
- エウロパの平均密度が 3.01 g/cm^3 であるためには質量の 10-15% が氷である必要がある。
- 反射率からエウロパの表面は氷であると考えられる。平均密度と中心核を持っていることから水氷の存在度は 15% 超である必要がある。
- ガニメデとカリストの平均密度は 2.00 g/cm^3 よりも低く、どちらも質量の 50% 以上が氷でなくてはならない。
- 衛星内の氷の存在度が正確に決められないのは水の位置的・形態的分布がよくわからないからである。
- イオやエウロパにおいて生物学的観点で興味深いのは潮汐加熱によって内部が加熱されることである。
- イオの軌道は円ではなく木星との間に潮汐が起こるのでイオが変形する時の摩擦によって加熱が起こり（潮汐加熱）イオでは火山活動が起こっている。
- イオの潮汐加熱はイオの軌道が円からずれていることに起因するが、エウロパやガニメデもその軌道のずれを引き起こす原因となっている。
- イオほどではないがエウロパでも潮汐加熱がある。

イオ

火山活動と生命が存在する可能性を結びつけるものは何であろうか？特に地球や火星について議論したように、火山活動に関係する熱水系の存在は生命の形成と進化において特別な役割を演じるかもしれない。火山活動による熱は生き物によって取り込まれるエネルギー源となる。熱は直接利用できないが、化学活性に与える影響を通して利用される。もし、イオに火山活動があって、地熱のエネルギー源があるとしたら、生命を宿することができるだろうか？

イオの最も驚くべき特徴は活発な火山活動である。とくにイオの表面全体が火山性の物質で覆われており、火山活動が探査機と地上の望遠鏡の両方で観測されている。イオで起こっている火山噴火は、地球ほどではないが幅広く様々なタイプがある。溶岩の湖から流れて固まったような特徴もある（図 13.3）。個々の溶岩流や central-vent volcanoes がある（図 13.4）。地球のハワイ島の楯状火山に似た火山地形がはっきりと見える（図 13.5）。しかし、地球のセントヘレンズのような大きくて爆発性の火山（explosive volcanoes）はない。イオで観測される地球では見られない特徴は表面から数百 km も吹き上がっている火山ガスのプルームやダストである（図 13.6）。これらのプルームは地球の間欠泉に似ているように思われるが、イオでは噴出する流体は水ではなく二酸化硫黄 SO_2 である。

イオの色が付いて見えるところのほとんどはおそらくいろいろな形態の硫黄である。 SO_2 の霜（frost）は白く（火山の火口の周りの白い斑の大部分）、硫黄自身は茶色、黄色、赤、オレンジなどの多様な色を示す。イオの火山活動の多くは硫黄の火山であると考えられており、溶けた珪酸塩岩というよりは様々な硫黄化合物が溶けたもので形成されている。イオには硫黄では説明できない特徴を持った火山もあり、それは珪酸塩の火山に違いない。だが、珪酸塩の火山と硫黄の火山の比率は良くわかっていない。

イオでは火山活動が活発に起こっているが、水がある証拠はない。実は、イオに十分な量の水があるかどうかは明らかでない。イオは木星に近く、衛星が形成される間に木星から受け取った熱で水が凝結しないくらいの温度を保っていたかもしれない。ガリレオ衛星が形成される間にそれらの間で微惑星の散乱があっただろうが、それによって木星系内にあった水に富んだ天体がイオに堆積したかもしれない。たとえイオのどこかに水があったとしても、それはあまり長い間残しておけなかったかもしれない。火山活動によって火山が噴火している近くでは硫黄が温かく保たれていだろう。より高い温度によって表面にある水の霜や氷が大気中へ蒸発するだろう。イオの重力は小さいので、蒸発した水は比較的容易に宇宙空間へ逃げてしまうだろう。また、プルーム自身は直接水を宇宙空間へ放出するだろう。火山活動が活発に起こっているということは、表面のあらゆる場所はおそらく少なくとも時々には加熱されただろうということを意味するだろう。

イオにはどんな形態の水もそれが存在する証拠はない。表面、大気、イオ周辺の宇宙空間もそうである。隠れた水が存在する可能性はあるのだろうか？火山活動が起こっている場所には（イオ）内部の深いところから出てきている水が少量だけある可能性がかもしれない。もし、乾燥した惑星に火山活動と少量の水があるとすると、地球外生命活動が存在する可能性がある。もしイオに生命が存在するとしたらこういった場所に隠れていなくてはならないだろう。This does seem like a stretch, however.（イオの）生命にはイオの非常に過酷な放射線環境で生き延びなくてはならないという問題がある。木星の磁場に捕ら

われた高エネルギー粒子は生命組織に大きなダメージを与える。最も妥当な結論は、火山活動があるといっても、イオには水も生命も存在しないというものである。

まとめ

- 火山活動に伴う熱水系が存在は生命の形成と進化に対して特別な役割を演じるだろう。
- イオでは火山ガスのブルームやダストがその表面から数百 km も吹き上がっているものがある。また、噴出する流体は SO_2 である。
- イオの火山の多くは硫黄の火山であるが、そうでない（珪酸塩の）火山もある。
- イオには水が存在するかどうかはわかっていない。
- イオの形成時に水があったとしても、活発な火山活動による高温でイオから水が逃げってしまったかもしれない。
- 火山活動によってイオの内部深くから水が出てきているところがあるかもしれない。もしイオに生命がいるとするとそういった場所でなくてはならない。
- イオではその過酷な放射線環境も生命にとって問題になる。
- イオには水も生命も存在しないと考えるのが最も妥当である。

エウロパ

エウロパはイオの隣に位置する（木星の）月であり、イオとは違っている。エウロパはその密度を考えるとおそらく 15%かそれ以上の水を含んでいる。もし水がエウロパ全体に一樣に分布しているとする、（水は）珪酸塩水和物や鉱物の構造の中に束縛された状態で存在しているだろう。それら（珪酸塩水和物や水を含んだ鉱物）は地球では比較的普遍的であり、例えば水と火山の珪酸塩鉱物との化学反応で作られる蛇紋石（serpentine）や粘土などである。もし、エウロパが層に分化していたとしたら、水はこれらの鉱物から解放され表面に現れてくるだろう。エウロパの表面には厚さ 300km の水の層がある可能性があり、これから議論するように、それは比較的浅いところで溶けているだろう。それは氷で覆われた液体の水の海を作っていて、もしかすると生命が隠れ住んでいるかもしれない。

エウロパ内に水が層になって溜まっている直接的な証拠はないけれども、表面に豊富な水氷があることはわかっている。表面から反射してくる日光が特定の波長を吸収することからそれがわかる。氷は比較的純粋であるが、実際にはいくらか不純物が混ざっている。

更に、エウロパの表面を汚している黒っぽい鉱物は、'クラック（clacked appearance）' を形成している（図 13.7）。テクトニックな応力によって表面の氷が割れたような多くの線状の地形がある（図 13.8）。多くのクラックは非常にきれいな水氷と思われるもので埋められており、それはすぐ下にも水氷があるのかもしれないことを示している（図 13.9）。ガリレオ探査機によって撮影された高解像度の画像には表面を物質が移動した明らかな証拠が見られる（図 13.10）。もしこの移動が地下から噴き出した液体の水や、表面を流れた

氷の塊によって引き起こされたものでないなら、氷（そのもの）の流れによって起こったに違いない。そして、簡単に流れるには氷は融点近くまで温まっている必要がある。

[図 13.7] エウロパの表面。ガリレオ探査機によって撮影されたもの。表面のクラックが暗い帯として見えており、明るい'プレート (plates) 'を分割している。(NASA 写真)

[図 13.8] このエウロパ表面の拡大画像には、暗い帯が平行な縁の連なりでできているのが見て取れる。それはまるで、明るい氷が引っ張られて割れ、直下から黒っぽい氷が噴き出してきてそこを埋めたようである。(NASA 写真)

[図 13.9] エウロパ表面の交差した溝。溝は氷が圧縮されたり引き伸ばされたりしたことを示す。(NASA 写真)

[図 13.10] エウロパ表面の拡大図。この画像から氷の塊はブロック状にバラバラになったように見える。個々の溝が塊からブロックに分かれていった様子を追うことができ、移動した量がわかる。(NASA 写真)

もし、表面に厚い水氷の層があるなら、そのすぐ下に液体の水があって氷で覆われた海を作っているだろうか？この質問に答えるには、エウロパ内部の熱バランスを見る必要がある。イオの内部を加熱しているのと同様に潮汐力がエウロパの内部を加熱しているが、それはイオよりもずっと弱い。エウロパはその内部の岩石に含まれる放射性元素の崩壊によっても加熱されている。内部が加熱されるにつれて、表面と内部の温度の差が大きくなる。温度差があると、熱は温度の高いところから低いところへ伝導する。従って、内部が加熱され始めるにつれて、熱は内部から表面へ伝わって宇宙空間へ放射されるだろう。惑星の温度は最終的には定常状態に達し、加熱も冷却もされなくなる。

潮汐と放射性崩壊による加熱の量から内部がどれだけ加熱されるかを見積もることができる。これにより、水氷が溶ける温度になっているところまではどれくらいの深さを掘らなくてはならないかを計算できるだろう。

エウロパが厚い氷の層で覆われているとすると、その内部で散逸している潮汐加熱の量はおよそ 8×10^{17} erg/s すなわち $2 \text{ erg/cm}^2\text{-s}$ である。もし表面のすぐ下に液体の水の層があるのならそのおよそ 2 倍の熱が散逸しているだろうし、核に溶けた層があるとしたら、もしかすると更に 2 倍散逸しているだろう。放射性崩壊によって生じる熱の量はおそらく地球の月の内部よりも多くはない。現在の月からの熱フラックスはおよそ $30 \text{ erg/cm}^2\text{-s}$ である。これだけの熱を熱伝導によって表面へ伝えるためには表面のすぐ下の温度は 1 m 毎に 0.005 K、つまり、1 km 毎に 5 K 上がる必要がある（表面が（固体の）水氷であると仮定した場合）。表面の平均温度が 120 K で水氷の融点が 273 K であることから、氷は深さたった数十 km で融点に達するほど温まるだろう。しかし、もし氷の層がたった約 100 km の厚さであり、また全加熱が可能な値の範囲の下限であったなら、（氷の層の）底の温度は氷が溶けるのに十分な温度まで温められないかもしれない。

しかし、この結論を変えうる要因が存在する。まず、表面近くの氷は密度の高い水氷ではないかもしれない。多孔質な霜 (porous frost) は固体の氷 (solid ice) ほど容易には熱を伝えないので、内部で散逸する熱が出て行くためには温度勾配はもっと大きくなる必要

があるだろう。もし表面が非常に多孔質で細かい粒状の霜で構成されているなら、温度は深さ 1 m 毎に 5 K 変わるようになるだろう。これは上で述べたよりも 1000 倍大きい値である。このことは、たった数百 m の深さで氷の融点に達し、水のマンツルのほとんどは液体であることを意味する。表層はおそらくとても多孔質で、より深い層ではもっと固くなっていく。こうして、深さ数百 m よりも下では液体の海がある可能性がある。

次に、たった数 m の深さでも典型的な表面温度である 120 K を大きく上回る温度まで上がるかもしれない現象がある。もし、そういうことが起これば、上で予想したよりも浅いところでも水（氷）が溶けるだろう。日光が表面で吸収されるのではなく、表面を通り抜けるというのもその一つである。氷は日光を通し、日光は吸収されずに表面よりもかなりの深さまで届くかもしれないので、そういうことが起こりうる。もし、そうなれば、日光が吸収される深さで表面のよりも十分高い温度まで加熱されるだろう。そのような振る舞いは温室効果で起こることに似ているだろう。温室効果では日光は容易に入ってくるが、熱は容易には逃げられない（ので起こる）。もし、エウロパでそのような'氷の温室効果（ice greenhouse）'があるとしたら、たった数 m の深さの温度は表面よりも 100 K も高くなるかもしれない。しかし、ボイジャー探査機による表面温度の観測ではエウロパは昼夜の変化がかなりあることが示され、日光は表面から数 cm 以上は通さないことが明らかになった。日光が非常に浅い深さまでしか通さないことから、氷の温室効果は 100 K ではなくたった 10 K 程度であろう。従って、おそらくエウロパの氷の温室効果による温暖化はほとんどない。

これらの要因を考えると、エウロパ表面下のある程度の深さに液体の水が存在する公算は非常に大きい。また、海が全球を覆っていなかったとしても、潮汐加熱が局所的に起こって局所的で小さなスケールの液体の水のポケット、おそらく地下の湖を作っているかもしれない。表面の画像には少なくとも一時的には液体の水が存在したことを示す興味深い痕跡が見られるが、液体の水が存在する確証はない。

もし、液体の水があるとすると生命が存在しうるだろうか？水以外にも、生命活動を駆動するエネルギー源や生命の素（biogenic element）の存在が必要である。これら 2 つはエウロパの海の底に存在する可能性がある。そこには珪酸塩鉱物があって水がと接している。

もし、エウロパの珪酸塩を含む鉱物が太陽系内のどこにでもあるようなものであるのなら、海洋-珪酸塩境界で容易に生命の素にアクセスできると期待できる。また、それがエウロパでは異なっていると理由はない。

融点近くの液体の水の中が持つエネルギーはそれ自体によっては生命活動を駆動できない。有機分子の形成や、生化学反応は化学非平衡によって生じる。タイタンでは太陽からの紫外線が非平衡を生み出すことを前に見たが、エウロパでは日光が液体の水があるところまで通り抜けるとは期待できない。初期の地球では稲妻が非平衡を生じる引き金となり、それによる化学反応で有機物や生命が形成された可能性がある。だが、これに関しても、稲妻がエウロパ表面から深いところへ届くことは期待できないだろう。

しかし、我々が期待することは、通常の惑星の地質学的過程は衛星の珪酸塩部分で起こっているということである（？）。エウロパは地球の月よりもほんの少しだけ大きさが小さく、質量も小さい（半径はおよそ 10% 小さく、1569 対 1738 km で、質量は 40% 小さく、 4.5×10^{25} 対 7.4×10^{25} g）。半径と質量が小さいので、エウロパの珪酸塩部分（その中には個々の鉱物の中にくらか放射性元素が含まれている）は月よりも放射性崩壊による内

部加熱が小さいはずである。しかし、エウロパの潮汐加熱はこの違いをうまく補ってエウロパの珪酸塩部分の状態が月の地質活動のレベルに似た状態になっているかもしれないと期待できる。月は最初のおよそ 1.5 億年間は火山活動があった。火山噴火は普通に起こっていて、溶岩が表面に噴出して大きな衝突盆地を埋め、地球側の反面に見られる暗い海の領域を作った。エウロパの海の下で起こる火山活動は地球の中央海嶺の拡大中心で起こっている火山活動に似ているかもしれない。

また、海と'海底 (seafloor)' の境界に熱水系があるかもしれない。それは地球の海底にある熱水系に似ているだろう。熱い火山岩を介して水が循環し温度が変化することで化学非平衡が起こり、有機分子が生成されたり、生命が生まれたりする可能性がある。これは (地球の) 生命の起源の可能性として地球の熱水系で考えられている過程に似ている。同様に、水による一次的な火山岩の風化は生命体によって利用されうるエネルギーを解放する。似たようなエネルギー源は地球上ではあるバクテリアによって取り込まれるし、火星でも利用されるかもしれない (第 8 章参照)。

火星のエネルギー源について行ったように (第 8 章)、エウロパのエネルギー源の目録を作ることができる。もし、エウロパ表面の岩石質の場所にある火山の数が月と同じくらいであるとみなすと、熱水系を通して利用できる全火山エネルギーを見積もることができる。また、水-岩石間での岩石の可能な化学風化を見ることによってその源からのエネルギーを見積もることができる。その全エネルギー量は非常に小さい。火山エネルギーは火星のものよりも十分小さいだろう。また、風化のエネルギーは風化を受ける岩石の層がどれだけ厚いかに因る。生命の元となるものに力を与えるのに使える十分なエネルギーがあるかどうか、現在、生命 (もしくは、水や氷の層内の過去の生命の痕跡) が存在するかどうかははっきりしない。

エウロパに生命はいそうか? 我々はエウロパをもっとよく探査するまではそれを知ることはないだろうが、必要な材料は存在するかもしれない。海までの厚さがわかっていない氷を掘ることなく生化学や生命活動を探す一つの方法はエウロパの表面にあるデブリの堆積物を見ることであろう。氷の上の水がクラックを通して表面へ流れてきたところでは、表面の堆積物は氷の下から運ばれそこへ運ばれてきた生体物質を含んでいるかもしれない。

まとめ

- エウロパには (質量の) 15% 以上の水があって、表面に厚さ 300 km 程の水の層があるだろう。それは比較的浅いところで溶けていて生命がいるかもしれない。
- 表面で反射される光の波長から表面の氷は比較的純粋で、不純物が混ざっているところもある。
- エウロパ表面には氷が割れて再び埋められたような線状の地形 (クラック) が存在する。それはその下に液体の水があるということかもしれない。
- エウロパ内の潮汐加熱 (イオよりは小さい) と放射性崩壊 (月よりは小さい) による熱を考慮すると深さ 1 km 毎に 5 K 上がる計算になる。このとき、深さ数十 km で水の融点に達する。氷の厚さや加熱の大きさの下限で見積もった場合には氷の底 (この場合、100 km) では融点に達しないかもしれない。

- 表面の氷が多孔質の霜 (porous frost) であると熱伝導率が小さいので地下の温度勾配が大きくなるだろう。この場合、深さ 1 m 毎に 5 K 上がり、深さ数百 m で融点に達するかもしれない。
- 日光が表面で吸収されず、より深くまで届くような場合を考えることができる。このとき、氷の温室効果 (ice greenhouse) が起こり、深さ数 m で表面より 100 K も温度が高くなるかもしれない。
- しかし、ボイジャー探査機の観測によると昼夜の表面温度の変化がかなりあり、日光は表面から数 cm 以上は通さないことがわかった。氷の温室効果はほとんど効かないだろう。
- 結局、エウロパ表面の氷の下には液体の水が存在しそうである。それは全球を覆うようなものでなく局所的な湖かもしれないが。
- 液体の水が存在する (た) 有力な痕跡はあるが、確証はない。
- 生命が存在するためには液体の水の他にエネルギー源と生命の素 (biogenic element) が必要である。
- 有機分子の生成や生化学反応は化学非平衡によって生じる。
- 日光や稲妻によって化学非平衡を作ることができるが、エウロパではどちらも利用できそうにない。
- エウロパでは海底 (seafloor) に熱水系があり、これによって化学非平衡が生じ、生命を生むかもしれない (地球でもそれが生命の起源の可能性として考えられている)。
- 今のところ、エウロパには生命を生むエネルギーが存在する (した) か、生命そのものが存在する (した) かどうかははっきりしない。が、生命に必要な材料と条件は揃っているかもしれない。
- エウロパ表面の氷の上のに堆積物を調べることで生命が存在する直接の証拠を見つけられるかもしれない。

木星大気中の生物

木星自体はどうだろうか？木星（自体）に生物が存在する可能性を考えることは突飛なことであるように思える。木星は巨大ガス惑星であり、ほとんど太陽の組成と同じ物質でできている。木星の肉眼や望遠鏡で見ることのできる部分は大気中の雲の層である。実は、大気は非常に深いところまでであると考えられており、我々が普通惑星の表面とみなす岩石質でできた表面は内部の極めて深いところにあるのかもしれない。更に、木星の内部は非常に熱くて有機分子が存在できない。有機分子はそれらを構成する分子に分解してしまうだろう。もし木星に生物がいるとすると、例えば、温度が地球の大気と同じくらいであるような大気中の目に見える雲の層の近くに閉じ込められていなくてはならない。しかし、例えば生物がいなくても、そこには確実に面白い生物化学が存在する。

木星の大気は主として水素とヘリウムでできており、それは太陽元素存在度 (solar abundances) と同じである。その意味で木星は太陽に似ている。太陽中に存在するその他の元素は全て木星にも存在するが、それらは微量成分である。水素以外の主な有機元素 O と C、N、S は全て検出されている。C と N、S は他の原子と結合して CH_4 や NH_3 、 H_2S の形で存在しているが、その比存在度 (relative abundance) は太陽に非常に近い。酸素は H_2O として大気の見える部分に存在しているが、太陽中の存在度と比べてかなり少ない。

木星生物が存在する可能性を理解するためには多少の化学と大気のエネルギー特性を理解する必要がある。大気は全体として非常にかき乱されている (turbulent)。それは重力収縮による余分な熱を取り除いたり、内部を安定させるために継続的に起こっている (大気の) 逆転 (overturning) である。約 10 時間という速い自転周期 (一日の長さ) と共にこの逆転によって、大気は湧き上がりの領域と沈み込みの領域に分かれて層を成す。これらの領域はそれぞれ '帯 (zone)' と '縞 (belt)' と呼ばれ惑星の同じ緯度を取り巻いている (図 13.1)。帯は大気中から湧き上がってきて冷却された気体でできていて、おそらく H_2O や NH_3 、 NH_4SH が凝縮した雲をいくらか含んでいる。これらの気体が凝縮してできた雲は白くなるはずであるが、木星の雲は様々な暗い茶色や赤、青である。従って、何か付加的な色をつけるものや発色団 (chromophore)³⁾ が存在するに違いない。

これら発色団は木星大気中で検出されているリン化水素 (phosphine) PH_3 などのリン化合物 (phosphorous) や様々な硫黄分子、有機分子を含んでいるかもしれない。メタン (CH_4) やエタン (C_2H_6)、アセチレン (C_2H_2)、シアン化水素 (HCN) といった単純な有機分子が大気中で検出されている。もし木星大気が化学平衡状態にあるのなら、全ての炭素はメタンとして存在しているだろう。また、全ての窒素は NH_3 、酸素は H_2O に含まれているだろう。炭素や酸素、窒素がそれらとは違う分子として (も) 存在しているので、木星大気中では系を化学平衡から遠ざける過程が起こっている。その過程は日光のエネルギーによって駆動されいているかもしれないし、他の分子が安定して存在している深い層から雲の高度までの気体の混合や、生物的な過程かもしれない。日光は確かに上層大気中のメタン分子を分解したり他の有機分子を生成する役割を果たしている。

木星大気中でもっと複雑な有機分子を生成する過程は初期の地球で起こっていたかもしれない過程と同じものである可能性がある (第 6 章参照)。稲妻や日光は大きな役割を果

³⁾有機化合物が染料となるために必要な要素 (リーダーズ英和辞典)

たしたかもしれない。実験室で木星と同じ条件でそれらの過程のシミュレーションを行うと複雑な有機分子が生成された。本質的には、ミラー ユーリーの放電実験で作られるのと同じタイプの分子が木星大気で作ることができる。疑いなく、木星には地球外生物学的に興味深い有機化学が存在する。

生命はどうだろうか？木星上の生命にとって最も大きな問題は、大きく大規模な生物相 (biota) は (重力で) 大気の深いところへ沈んでしまい、小さく微小なバクテリアは大気の沈み込みの領域で (流れに乗って) 下の方へ運ばれてしまうということである。生命は深いところへ運ばれるにつれて有機分子が破壊されてしまうような高い温度に達してしまうだろう。(木星に) 存在するかもしれない生命は大気の上層の涼しいところでのみ生き延びられる。しかし、木星の生物相はこの問題をうまく避けられる可能性がある。それらは多くの子孫をその親が死滅する前に生み出すことができる。多くの子孫が大気の深いところへ引き込まれて死んでしまうけれども、いくらかは生きることのできる高い高度へ上がってくるかもしれない、それによって種が生き延びられるかもしれない。もしくは、それらは木星大気中で浮力を生み出す、気体で満たされた袋を作るかもしれない。これによって温度の高い大気の深いところまで沈んでいくことなく生き延びることができるだろう。しかし、生き物が十分な浮力を持つほど大きく成長するには、なんらかの運動する機能を持ち、他の生き物を食べてそれを更に大きく成長する材料にすることができなくてはならない。すなわち、狩りができる、ということである。そのような生き物はおそらく探査機の画像で見ることができくらい十分大きく成長しているだろう。

木星上に生命が存在する可能性はないことはないが、あまりありそうもないように思われる。適度な大きさのバクテリアが繁殖し、適度な期間生き残れるかもしれないが、生き延び続けることのできそうな環境は非常に狭く、種に非常に厳しい要求を課すだろう。種にとって、生き延びられそうもないことが起こる段階を経験することなく、適度な特徴を持ったものへ進化するのは難しいだろう。例えば、木星の生命の起源は地球の生命の起源に似ている (第6章) が、有機分子の生成や一般的な地球の種よりもずっと小さく単純な種を生み出したかもしれない。これらの分子や単純な種は大気の運動に捕らえられてしまうくらい小さい。これは比較的速く有機分子が分解するような深い層へ運ばれるということかもしれない。単純な生物が生き残るのは非常に難しいと思われる。

加えて、地球の生命の起源は液体の水中の前駆物質の 'スープ' の中であったのかもしれない。木星大気中に存在するそのようなスープは非常に薄い (thin)。現在存在する有機分子や生命が存在するために必要な生命の素は非常に少量しか存在せず、アクセスするのは極めて難しい。

一方、我々は地球の生命についていかに理解していないかを心に留めておかななくてはならない。地球において、たった十年前には生命が生きられないと考えられていた環境に生命が見つかっているのである。地球では生命が存在するの適していると思われるところ (niche) のほとんど全てに生命がひしめいていると思われる。

まとめ

- 木星大気の深いところは温度が高過ぎて有機分子が分解してしまうので、もし生命がいるとすると雲の層のあたりの適度な温度のところにいるだろう。

- 木星大気成分はほぼ太陽と同じである。微量成分の C、N、S は CH_4 、 NH_3 、 H_2S の形で存在している。O は H_2O の形で存在しているが太陽中の存在度と比べてかなり少ない。
- 木星大気は湧き上がりの領域である帯 (zone) と沈み込みの領域である縞 (belt) が存在する。
- 帯には H_2O 、 NH_3 、 NH_4SH などの雲がある。また、色をつけるような物質も含まれているはずである。
- 木星大気は化学非平衡状態である。
- 稲妻が木星大気中での有機分子の生成に大きな役割を果たしているかもしれない。
- 木星の生命は、大きすぎると重力で沈んでしまい、小さすぎると流れに乗って沈み込み帯で沈んでしまうという問題がある。
- その問題を避けるには、親が死滅する前に子孫をたくさん残すことや浮力を生み出す袋を持って上層に留まることである。
- 十分な浮力を持つような生き物はかなり大きくなくてはならず、そのように大きく成長するには狩りをしているだろう。また、もしそうならば探査機でその映像を捕らえることができるかもしれない。
- 木星上では生命が生き延びられる環境は狭く、生命はあまりいそうにない。
- 生命の前駆物質へのアクセスも難しい。
- しかし、地球においても、生命がいなさそうなところに生命が見つかることから、木星でも全くいないとはいいきれない。

結論

木星系に生命は存在するか？生命が実際に存在するかどうかの証拠はないが、生命がそこに存在すると考えられる理由はある。生命に必要なと思われる主要な特徴を一覧にすると 液体の水、利用可能なエネルギー源、生命の素へのアクセス そのかは生命が存在する可能性がある。イオは 3 つのうち少なくとも 2 つ (エネルギーと生命の素) があり、3 つめ (水) もあるかもしれない。しかし、イオ上には水が存在する直接的、間接的証拠がなく、水がないと考える理由がある。エウロパは 3 つのうち 2 つ (エネルギーと生命の素) を持っていて 3 つ目もあるかもしれない。液体の水のマントルがエウロパの氷の下にある可能性があり、again, the presence of liquid water, although suggested, is not required by any existing measurement. 木星も 3 つのうち 2 つ (エネルギーと液体の水、液体の水は大気中の雲として) を持っているが、生命を生き延びさせられるほど多くは生命の素が存在しそうにない。

地球と火星の次では、太陽系内ではエウロパが最もその上 (on) (もしくは内部 (in)) に生命がいそうに思える。エウロパは生命が誕生するのに必要な 3 つの環境を全て持って

いるかもしれない。次に（生命が）いそうな惑星は3つのうちすくなくとも2つがあるイオと木星、土星の周りを回るタイタンである。生命が生まれるような惑星をたくさん見つけるためには、我々の太陽系の外へ冒険に出なくてはならないだろう。

まとめ

- 生命に必要な3つの要素は「液体の水」「利用可能なエネルギー源」「生命の素へのアクセス」。
- イオはその3つのうち2つを持っているが3つ目（水）はなさそうである。
- エウロパには3つありそうである。
- 木星自体には2つはあるが3つ目（生命の素）が十分でないようだ。
- 地球、火星の次に生命がいそうなのはエウロパである。
- その次はタイタンである。
- 生命がいそうな惑星をたくさん見つけるには太陽系外へ行かなくてはならない。