

太 陽 系

宇宙時代の幕開け

1957/10/4、ソ連はスプートニク(人工衛星)1号を打ち上げ、地球周回軌道に乗せます。更に 1959/9/14 にはソ連は國章等を乗せたロケットを月に到達させました。

これらの事件は世界の盟主を以て任じる米国民に深刻なショックを与えました。国家の威信が傷つけられ、安全保障を脅かされたためです。これに対抗して、ケネディ大統領は 1961/5/25、「1960 年代に月着陸」を目標としたアポロ計画を発表します。米ソ両国の威信をかけた宇宙開発時代の開幕です。

“……I believe that this nation should commit itself to achieving the goal, before this decade is out, of landing a man on the Moon and returning him safely to the Earth. No single space project in this period will be more impressive to mankind, or more important in the long-range exploration of space; and none will be so difficult or expensive to accomplish……” (ケネディ大統領の声明の一節)



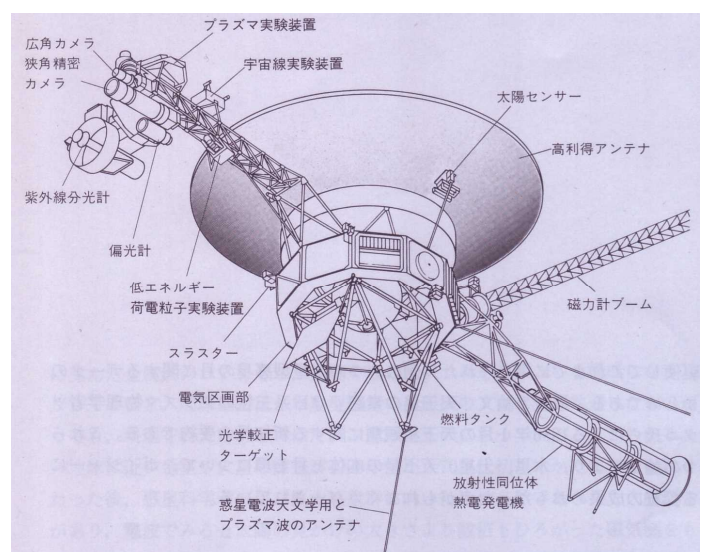
アポロ 11 号の出発

この競争は 1969/7/20 にアポロ 11 号の月面着陸と帰還で勝負が着きました。米国はアポロ計画に 254 億ドル(2005 年時価換算 1,350 億ドル)と延べ 40 万人の人員を注ぎ込み、ソ連は技術力でも経済力でも、対抗しきれませんでした。

出発時のアポロ宇宙船の重量は 2,941 トン、全長 111m、第 1 段は推力 694 トンの F1 型エンジン 5 基を備えた史上最大の 3 段ロケットでした。対抗するソ連は F1 のような大型エンジンを開発することができず、第 1 段に 30 個ものエンジンを束ねましたが、自爆してしまい、どうしてもうまく行きませんでした。

この宇宙開発競争は天文学に長足の進歩をもたらしました。特に右図のボイジャーに代表される多数の惑星探査機による調査は、対象に接近してこそ得られる惑星の真の姿と詳細な諸特性を我々に知らせてくれました。

これにより、火星にはエベレストの 3 倍の標高のオリンポス山があり、金星の雲の下には想像もしていなかった火山性の荒野と溶けた溶岩原があり、2 本にしか判別できなかった土星の輪は数千本のリングより成ることなどが初めて人類に知らされました。また、地球周回軌道上のハッブル宇宙望遠鏡を始めとする各種の観測装置は、大気の揺らぎや大気圏での電磁波吸収のない宇宙空間で、現在も遠い宇宙に関する新しい情報を続々ともたらしてくれています。



「別冊サイエンス 76：ボイジャーの惑星探査」p8

日経サイエンス社

このテキストでは、**太陽系**について述べます。この分野では多数の探査機の活動のお蔭で、半世紀前に比べて驚くほど大量の正確な情報が得られつつあります。

来年にはテキスト「宇宙と物質」により、**物質の生成・転換**について説明します。

軽い原子核である水素、ヘリウムが融合して重い原子核の物質に転換する核融合反応で熱エネルギーを発生したり、超新星の爆発の瞬間の中性子過剰環境で鉄より重い元素が作られるなどの原理を知ることにより、太陽や他の恒星の進化をより良く知ることができます。

次いで**宇宙の姿、その構造、誕生と進化についての現在の知識**を紹介します。

ここまで来ると、話は 137 億年前の宇宙創成にまで及びますから、場所も時間も現在より余りに遠く、人類の知識もこれまでのテキストのように明快には語れず、研究者たちは研究が進展する毎に新たな謎が立ち塞がる状態に直面して苦戦しています。1957 年のスプートニク以前の太陽系に関する人類の理解の程度と事情が似ているかも知れません。

現在、最大の謎となっている「暗黒物質」「暗黒エネルギー」も 50 年後の貴方は真相を知ることができる可能性があります。今後の人類の進歩に希望を託しましょう。

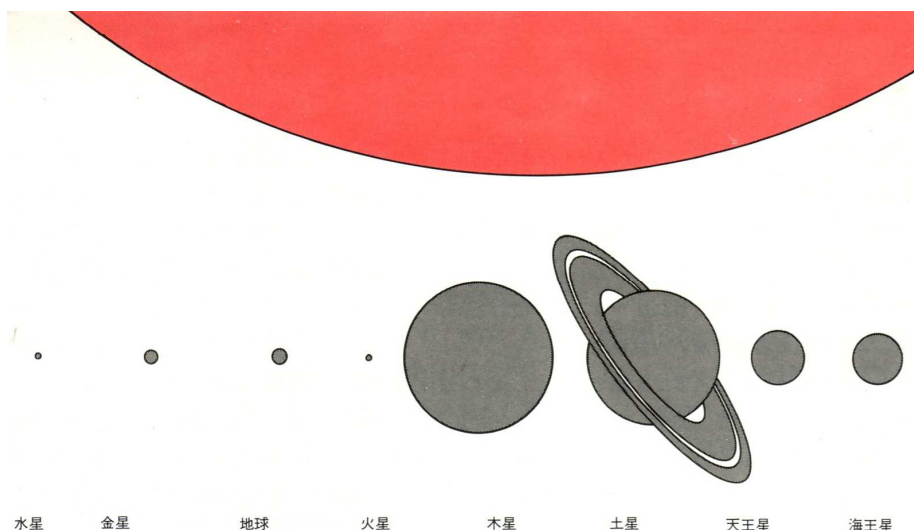
1. 太陽系の全体像

我々が住む地球を含む太陽系 (Solar System)には惑星(Planet) が8個あります。

惑星とはギリシャ語で「さまようもの」を意味し、天文学上の定義は ①太陽の周りを回り、②自重で球形を形成し、③その軌道近くから他の天体を排除したもの、とされています。

右図は太陽(部分)と惑星を比例尺 (同比率で縮小)で示したものです。

下表に各惑星の距離、質量等の諸元を示します。



(「太陽系」C.サガン／サイエンス 1975/11/1、p18)

太陽系の惑星の諸元

諸 元		水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
太陽からの 平均距離	100 万 Km	57.9	108.2	149.6	227.9	778.3	1,427	2,869	4,496
	天文単位(AU)	0.387	0.723	1	1.524	5.203	9.539	19.18	30.06
公転周期		88 日	224.7 日	365.2 日	687 日	11.86 年	29.46 年	84.01 年	164.8 年
軌道の離心率		0.206	0.007	0.017	0.093	0.048	0.056	0.047	0.009
自転周期		59 日	逆 243 日	23.93 時	24.61 時	9.83 時	10.23 時	逆 11 時	16 時
自転軸の傾き		28°	3°	23° 27'	23° 59'	3° 05'	26° 44'	82° 5'	28° 48'
赤道直径 (km)		4,880	12,104	12,756	6,787	142,800	120,000	51,800	49,500
質量 (地球=1)		0.055	0.815	1	0.108	317.9	95.2	14.6	17.2
体積 (地球=1)		0.06	0.88	1	0.15	1,316	755	67	57
密度 (水=1)		5.4	5.2	5.5	3.9	1.3	0.7	1.2	1.7
表面温度 (°C)		Max.430	460	平均 14	平均 -43	-150	-180	-210	-220
表面重力 (地球=1)		0.37	0.88	1	0.38	2.64	1.15	1.17	1.18
知られている衛星の数		0	0	1	2	61	31	27	13

(「太陽系」C.サガン／サイエンス 1975/11/1、p18) 但し、表面温度、衛星の数は最新データによる。

上表の「自転周期」で「逆」とあるのは、公転と逆方向に自転していることを意味します。

「自転軸の傾き」は公転軌道面に対する傾きです。金星や木星は公転軌道面に真っ直ぐに立って自転し、天王星は殆ど横向きで自転しています。

「地球と生物」で ①太陽の 8 倍以上の質量がある星が超新星となって爆発した跡に残された物質が重力で円盤状に凝集し約 45.5 億年前に太陽系が創られた、②太陽系惑星円盤の内、原始太陽の放射圧により近くのガスが吹き払われ、残った岩石群から水星、金星、地球、火星といった岩石惑星が生まれた、③地球が周囲の岩石を集めて出来上がるまでの時間は約 3,000 万年であったと推定される、といった事象を説明しました。更に付け加えれば、④太陽から遠く、太陽の放射圧が弱い領域では残ったガスを重力で集めて木星と土星などのガス惑星が生まれた、となり、これで太陽系誕生のおおよそのシナリオが描けています。

このテキストとでは、太陽系の各メンバーを内側から順次紹介しますが、ここでは「物質」は貴方がイメージする通りの不変不滅の「モノ」として取り扱われます。

但し、太陽系の全質量の 99.9% を占める太陽の内部では、水素が高温高压下でヘリウムに転換する核融合反応で熱エネルギーを生産しており、「物質」は不変不滅ではなく、次々と変転する「モノ」として理解せねばなりません。このことは、テキスト「宇宙と物質」で詳しく説明します。

結論を急ぐと、原子核が軽い物質は核融合する毎に質量をエネルギーに転換して重い原子核に転換する過程を鉄になるまで続けます。鉄の原子核は核子当たりの潜在エネルギー (Potential Energy) が最低の状態で、もはや核融合でエネルギーを生産することができません。鉄とそれに近い仲間のニッケル等が岩石惑星の中心核 (Core) の主要成分になっているのはその為です。

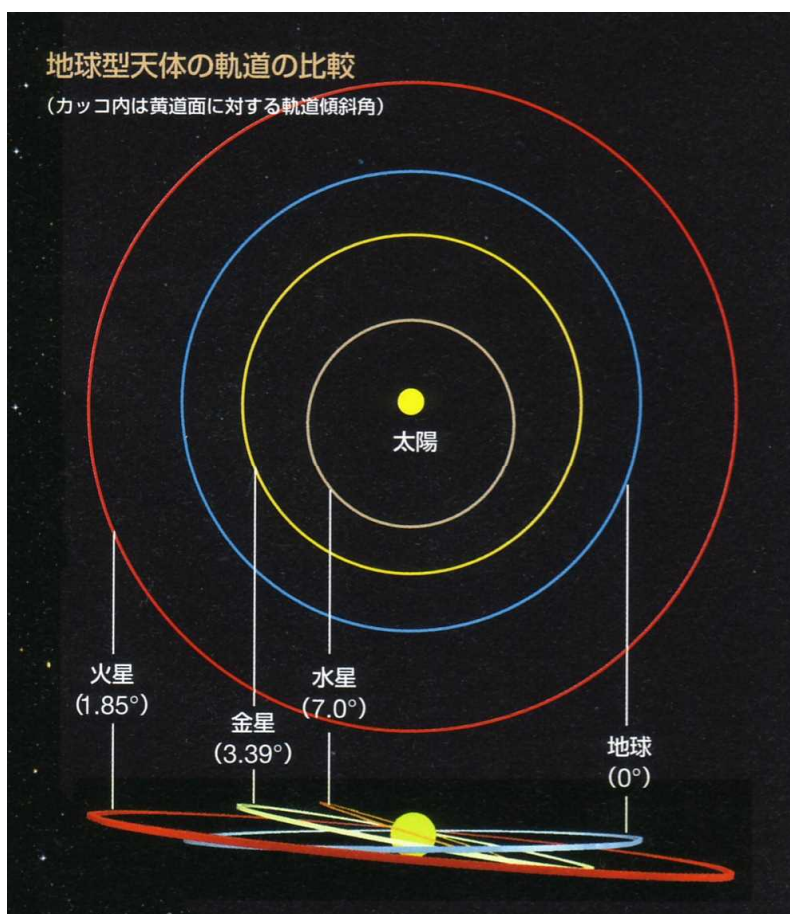
これらの事情を理解しないと太陽の振る舞いが理解できません。そのため、太陽を説明する場所を「宇宙と物質」に近い最後の章に置きました。

さて、前頁「太陽系の惑星の諸元」の「太陽からの平均距離」で見る通り、太陽・地球間の距離を 1 天文単位 (AU: Astronomical Unit) と定義すると、太陽・海王星間の距離は 30.06AU となり、これらを 1 枚の図では描ききれませんので、内惑星、地球型天体などと呼ばれる四つの岩石惑星から話を始めましょう。

右図のように「ケプラーの第 1 法則」により「惑星は、太陽を一つの焦点とする楕円軌道上を動き」ます。

参考までに、「円は中心からの距離が一定の点の軌跡」であり「楕円は二つの点(焦点)からの距離の和が一定の点の軌跡」です。楕円は細長い円ですが、円の直径に相当して長い方の直径を「長径」、短い方の直径を「短径」と呼び、「長径に対する焦点間の距離の比率」を「離心率」と呼びます。水星は 0.206 という大きい離心率を持つため、右図で水星の軌道の中心は太陽から若干外れています。

また、右図には地球の公転面 (黄道面) からの各惑星の軌道の傾きを記入しています。



(別冊日経サイエンス 144「火星とその仲間たち」、p58)

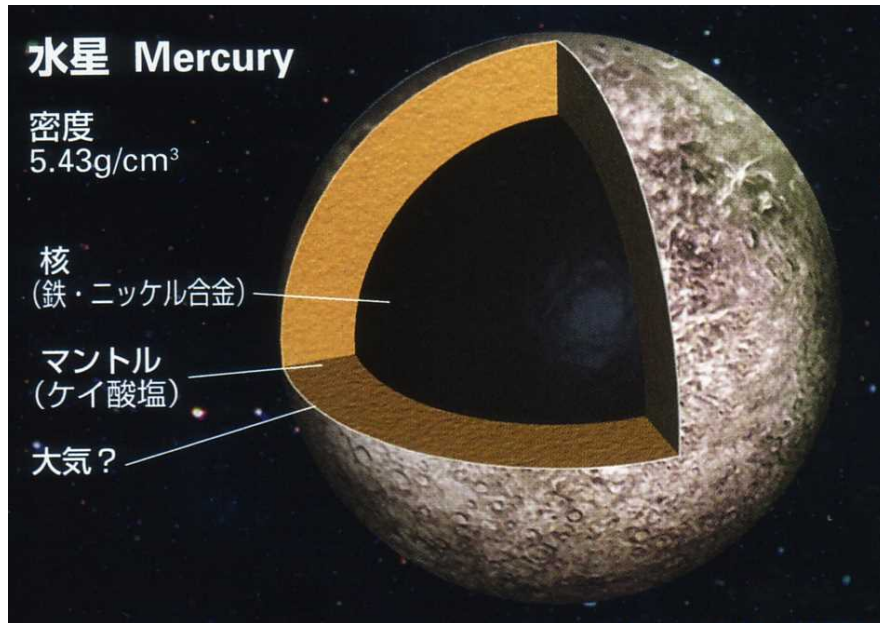
太陽を公転する同じ軌道上の物体は、同じ公転周期を持ちます。

惑星の軌道は安定しているように見えますが、38 億年前に惑星の中の大物である木星と土星が軌道共鳴を起こして当時から見ると太陽から遠い現在の位置まで移動し、近い位置にいた海王星が現在の遠い位置まで跳ね飛ばされるなど大混乱を起こしたことが判っています。彗星や小惑星が暴走し、惑星上に見られる隕石痕は大部分がこの時期のものです。その後は現状で軌道が安定し、今後数十億年の範囲ではそのような現象は発生しないと計算されています。

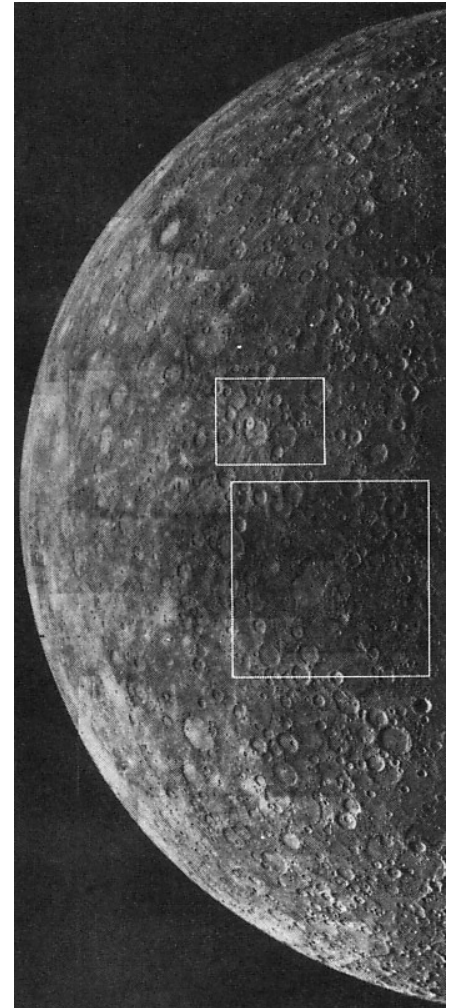
では、最初に水星を訪れましょう。

2. 水星 Mercury

右の写真は水星の地表の一部です。月と同じような大きな多数のクレーターを有する荒涼たる景観の惑星です。水星は太陽に近いので、地球からの観測が難しいのです。水星は質量が小さい(地球の 5.5%)ため大気を持たず、近日点(太陽に最も近づいた地点)では単位面積当たり月の 10 倍の太陽エネルギーを受け、真昼の地域の温度は赤道では 430℃になり、反対側の夜の面では-170℃という極端な気象条件です。



水星の内部構造 (Newton 不明、p30)



水星の外観

(サイエンス 1975/11/1、p50)

太陽の重力に干渉されて水星は2公転で3自転する軌道共鳴状態にあり、接近時に太陽に向かった面は長時間同じ面を太陽に向けることになります。水星は地球と同じく密度が高い惑星で、大略 左上図の様な内部構造を有しています。

また、弱いけれど地軸に沿った地球と似た地磁気を有し、その生成原因については、今のところ、諸説あって確定していません。

マリナー10号等の少数の探査機が派遣されましたが、現在までのところ、研究者の関心をあまり引かない惑星であるようです。

3. 金星 Venus

金星は常に厚い雲に覆われており、雲の反射率が高いため「明けの明星」「宵の明星」と呼ばれるように太陽の光を照り返して非常に明るく輝きます。

これまでに多数の探査機が送り込まれ、研究が進んでいる惑星です。

金星、地球、火星は太陽系の中で水が液体で存在し得る生存可能領域

(Habitable Zone) に位置するため、天体望遠鏡しか観測手段がなかった時代には、あの厚い雲の下には密林があるか、草原があるかと人々の想像力を掻き立てましたが、探査機からもたらされたデータは誰も想像していなかった灼熱の地獄の惑星でした。左の写真はレーダーで観測した金星の北極方向の地表の様相です。金星地表に軟着陸したソ連の探査機ベネラ7号は大気圧は約93気圧で主成分は炭酸ガス、地表温度は473℃というデータを送信してきました。岩石はほのかに光を発し、火山活動や溶岩流出が盛んに起こっています。我々から見える雲は濃硫酸でした。

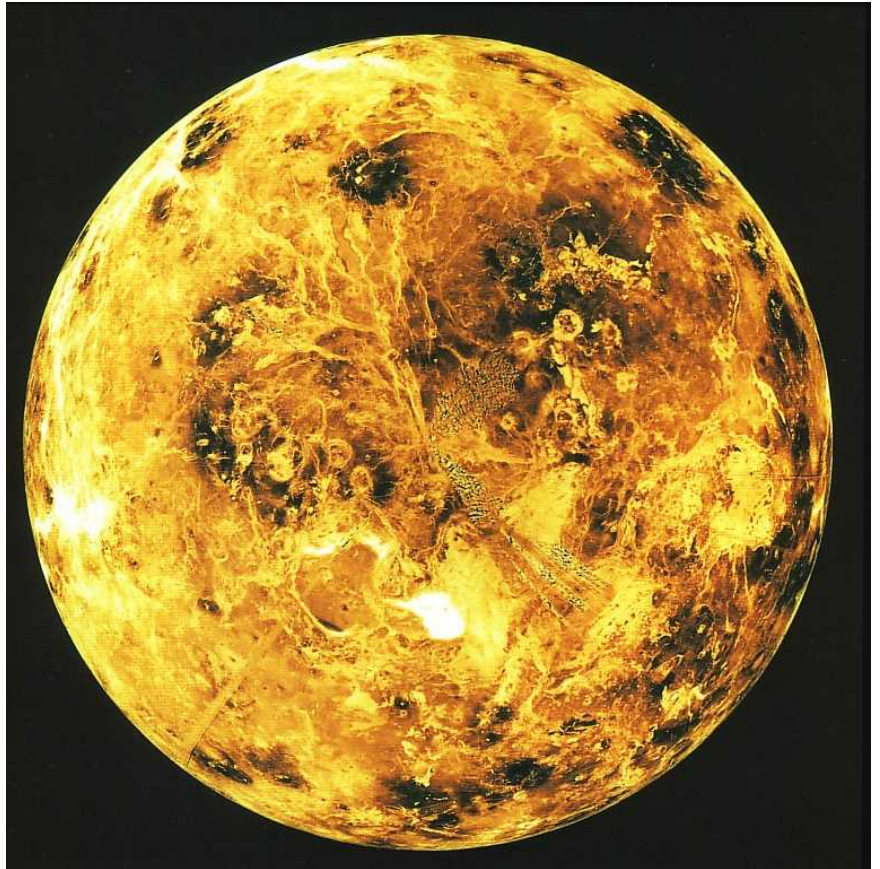
惑星は太陽から受けるエネルギーによって熱せられ、そのエネルギーを赤外線にして宇宙空間に放出します。この熱入力と熱出力がバランスしている状態を放射平衡と呼びますが、金星は反射率が高い雲を持つため太陽のエネルギーを反射する量が多く、熱平衡から予測される温度は、金星は-46℃、地球は-17℃です。

大きさも組成も殆ど同じ双子のような金星と地球の運命を分けたのは濃密な温室効果ガスである炭酸ガスです。

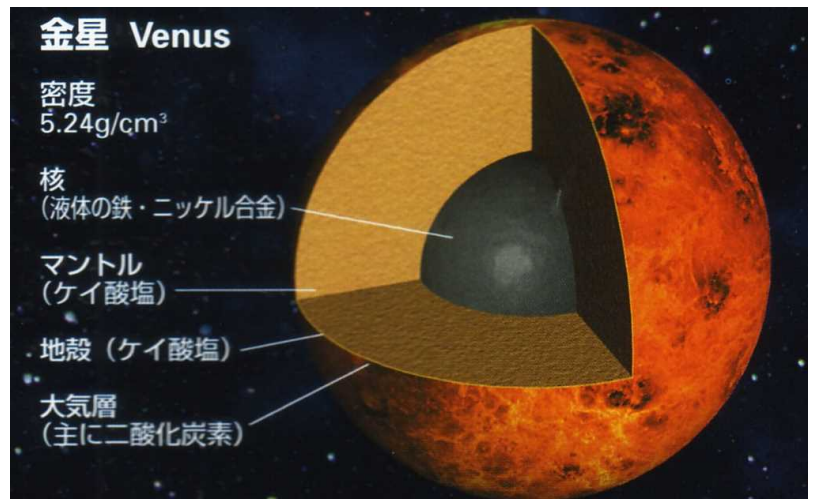
約8億年より以前の隕石衝突痕跡が見当たらない、大気の水素中の重水素比率が高い、リボンと呼ばれる地表の溶岩収縮皺の存在等と現在得られている諸データを元にシミュレーションした結果、次のようなシナリオが提案されています。金星も地球と同じく水

が豊富な惑星でしたが、8億年前に火山活動が活発化して大量の温暖化ガスが放出されます。水蒸気は10倍に、亜硫酸ガスは100倍になったと見積もられています。しかし硫酸の雲（亜硫酸ガスと水分が反応して硫酸になる）の太陽光遮断効果により地表温度は一旦は約100℃低下します。

大気圏の最上層に昇った水分子は太陽光の紫外線で水素と酸素に分解され、軽い水素原子は大気圏外に去り、水素の重い同位元素である重水素は残って水素中の比率は地球の150倍になりました。



金星のレーダー像（日経サイエンス 1999/6、p18）



金星の内部構造（Newton 不明、p31）

亜硫酸ガスは地表の炭酸塩岩と反応して時間と共に減少します。やがて雲が薄くなって太陽光が地表に届くようになり、加熱が始まります。2億年後には雲の底辺からも蒸発して気温が上昇し、暴走加熱が始まり、現在の姿になりました。（「Global Climate Change on Venus」 M.A.Bullock 他／Scientific American March1999）このシナリオは現在のところ、学会の定説として確立している訳ではありません。今後の研究の進展が待たれます。

金星にはスーパー・ローテーションといって、全緯度で赤道自転速度 1.6m/秒の約 60 倍に当たる約 100m/秒で自転方向に大気が循環する現象がありますが、目下研究中で、まだ、説明がついていません。

金星上空の超強風

金星上空の風速は、6年間で1.3倍になり、秒速約111メートルに達している。

●ESA Space News
2013年6月18日

金星大気の上部では、非常に速い風が吹いている。金星が243日かけてゆっくり自転するのに対して、この風は自転を追いこすように、わずか4日程度で金星を1周する。この風を「スーパーローテーション」とよぶ。

ESA（ヨーロッパ宇宙機関）の「ビーナス・エクスプレス」は、

スーパーローテーションのイメージ

金星大気の上で吹く風が、6年間で1.3倍に速まっていることがわかった。

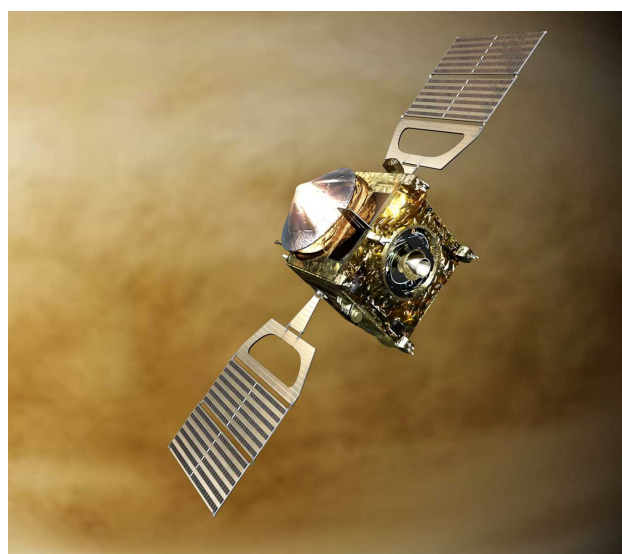
2006年に金星に到着して以来、継続的に金星の観測を行っている。撮影された画像に映る流されている雲の動きをもとにその場の風速がわかる。こうして求められたスーパーローテーションの速度は、金星到着当時は秒速約83メートルだったが、その後段々と速くなり、6年後には秒速約111メートルに達している。速度の変化は場所や、その時の太陽の方向によってもちがうようで、速度がより急激に変化している場所もある。

実は、スーパーローテーションは原因もその加速のしくみもよくわかっていない。そのため、科学者を悩ます問題となっている。

(Newton2013年9月号 p7)

前出「太陽系の惑星の諸元」に見るように、金星と地球の直径は殆ど同じです。

金星の自転は公転とは逆回転で地球と軌道共鳴しており、金星の1日は地球の116.8日となります。その5倍である584日毎の地球との会合時（最接近時）には常に同じ面を地球に向けています。



衛星探査機ビーナス・エクスプレス (Google 画像)

4. 地球 Earth

前の方で 38 億年前の太陽系惑星の軌道大混乱に触れました。その時期には地球も大小の隕石が落下する修羅場と化しましたが、悪いことばかりではなく、氷の塊であるような彗星が多数地上に落下して大量の水をもたらしたようです。

地球が「水の惑星」「生命の惑星」と呼ばれていますが、その水の相当部分が彗星によってもたらされたものだとして理解されています。

地球と月については「地球と生物」で詳しく書きましたので重複を避け、ここでは金星との関連において説明します。

原始太陽の放射エネルギーは現在のおよそ 70%に過ぎませんでした。こんなに太陽光線が弱ければ、本来ならば地球の水はガチガチに凍っているはずですが、当時の濃厚な地球温暖化ガスで地球は温室状態となり、生物が海中で進化することができました。

今後、太陽は徐々に輝きを増して行き、約 10 億年後には地球でも海洋からの水蒸気蒸発が盛んになり、水蒸気の温室効果により暴走加熱が始まることは長期的には避けられない運命です。

左上図に見るように、金星と地球はよく似た内部構造をしており、双子惑星とまで言われます。地球の暴走加熱の果てには、この二つの惑星は誕生時と同じく、見分けが着かない双子惑星に戻ることになるでしょう。太陽は更に加熱膨張を続け、約 50 億年後には赤色巨星となって地球の公転軌道の近くまで膨れ上がります。

これを見ると貴方は地球の未来の運命が心配になると思います。しかし、人類に生存の意志があるなら、必ずや星間旅行を実現することでしょう。現在の貴方がたが人類の存続や進歩にける熱意や努力が、将来の人類の進歩に役立ち、人類の生き残りの機会を増します。人類の能力・叡智に期待しましょう。

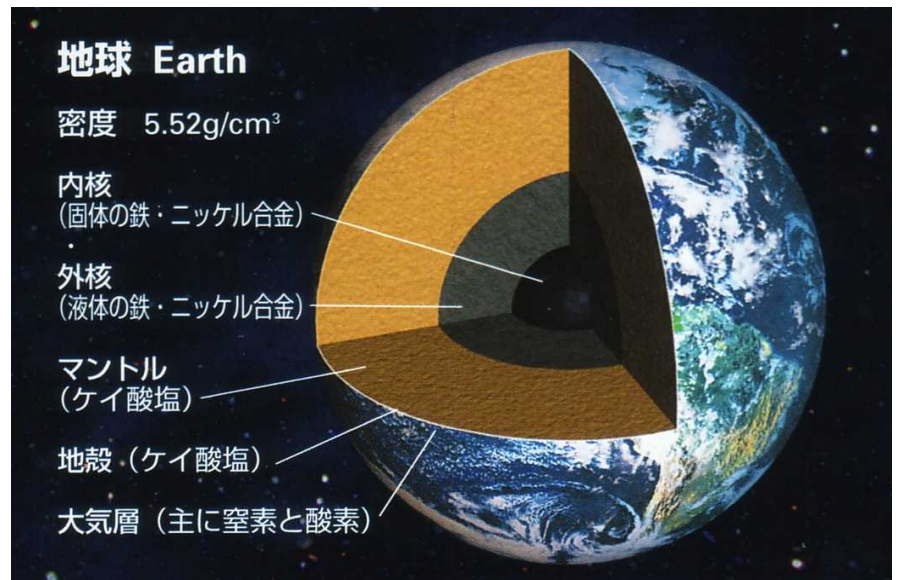
太陽系以外の恒星にも惑星が発見されつつある：

かに座 55 番星は、地球から約 41 光年の距離にあり、双眼鏡で簡単に見ることができる恒星である。質量や年齢は太陽と同程度で、これまでに……四つの惑星が見つかった。アメリカ、サンフランシスコ州立大学のフィッシャー博士等はハワイにあるケック望遠鏡などを使って、この惑星系の 5 番目の惑星を発見した。太陽系以外で**五つの惑星をもつ**のは、現時点ではこのかに座 55 番星だけだ。この第 5 惑星は土星ほどの重さのガス惑星で、地球のように水が存在できる領域にある。……太陽系にある巨大ガス惑星は、全て岩でできた衛星を持っている。博士等は、かに座 55 番星で地球に似た惑星を発見したい、と述べている。

(JPL News Releases2007/11/6)

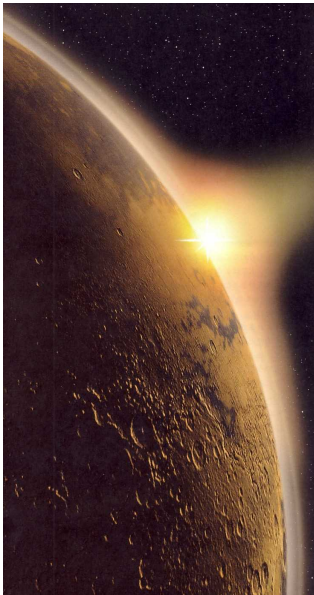
「……人間には自分より劣った生き物を思いやる能力があり、他人だけでなく卑しい生き物にも善意を向けることができ、太陽系の動きや構成までも理解できる神々しい知性がある。……」

「人間の由来 (The Descent of Man and Selection in Relation to Sex)」ダーウィン 1871 年



地球の内部構造 (Newton 不明、p31)

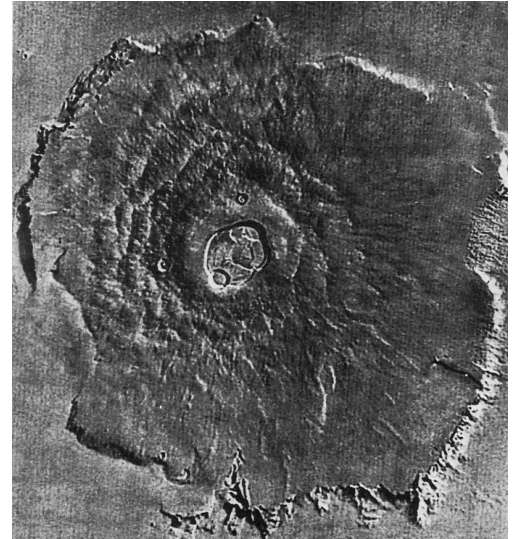
5. 火星 Mars



「火星の運河」説、ウエルズの SF「火星人襲来」等、古くから火星は人類の想像力を掻き立てて来た惑星です。そして、宇宙時代の今日も、なお、火星は人類に謎と希望を与え続けてくれています。

火星には多数の探査機、周回衛星、着陸船とその探査車が送り込まれ、情報を蒐集し続けており、地質学者が研究できる対象になりました。

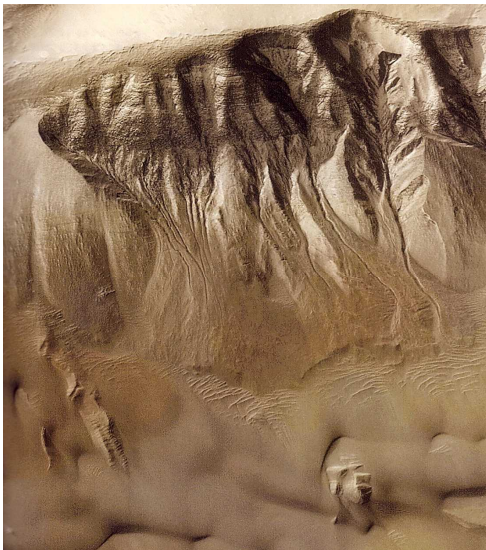
左上の写真は周回衛星から写したもので、薄い大気層を通して美しい日の出が見えます。



右上の写真はオリンポス山を上空から撮影したものです。オリンポス山

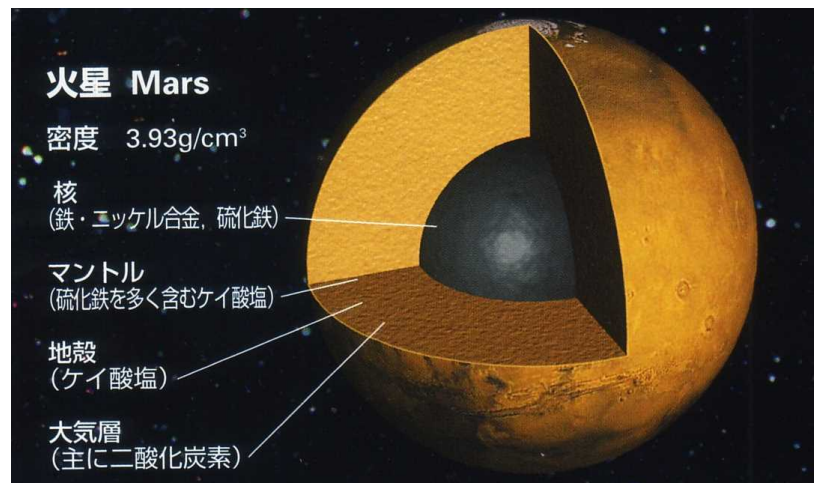
は太陽系最大の標高 21,287m を有し、ハワイのマウナケア山のようにのっぺりと盛り上がった盾状火山で、直径は約 600 km あります。因みに地球ではエベレスト山の 8,848m、金星ではマクスウェル山の約 11 km がそれぞれ最高峰です。

左下の写真はニュートンクレータの北側を撮影しています。写真に写った範囲は 30 分ほどで歩ける程度の距離ですが、明らかに斜面に水が流れ下ったような跡が幾本も見られます。大規模な流水の跡は火星の各地に見られ、極冠にも水の存在を示す反応があります。しかし、地質学的には、火星の大部分の地域の火成岩は水による浸食・変成等の作用を受けない太古のまま



砂丘に水が流れた痕跡

(別冊日経サイエンス 144、p15)



火星の内部構造 (Newton 不明、p30)

の地質状態を保っています。このことと、

明白な大量の水の存在の間の説明がついていません。目下のホットな関心は水と生命体の発見です。

大気圧は約 0.007~0.009 気圧で、95.3%が炭酸ガスで、酸素は僅か 0.13%しか含みません。

気温は-130~+15℃で平均温度は-43℃です。大気は希薄ですが、激しい砂嵐が頻繁に発生しています。

火星にはまだ人間が着陸したことはありませんが、これまでも、これからも多数の探査機が種々の目的をもって訪れており、遠からず、生命や水の存在の議論には決着が着きます。

将来的には、資金と情熱が許せば、宇宙開発の対象となり、有人基地が出来ることが確実視されています。

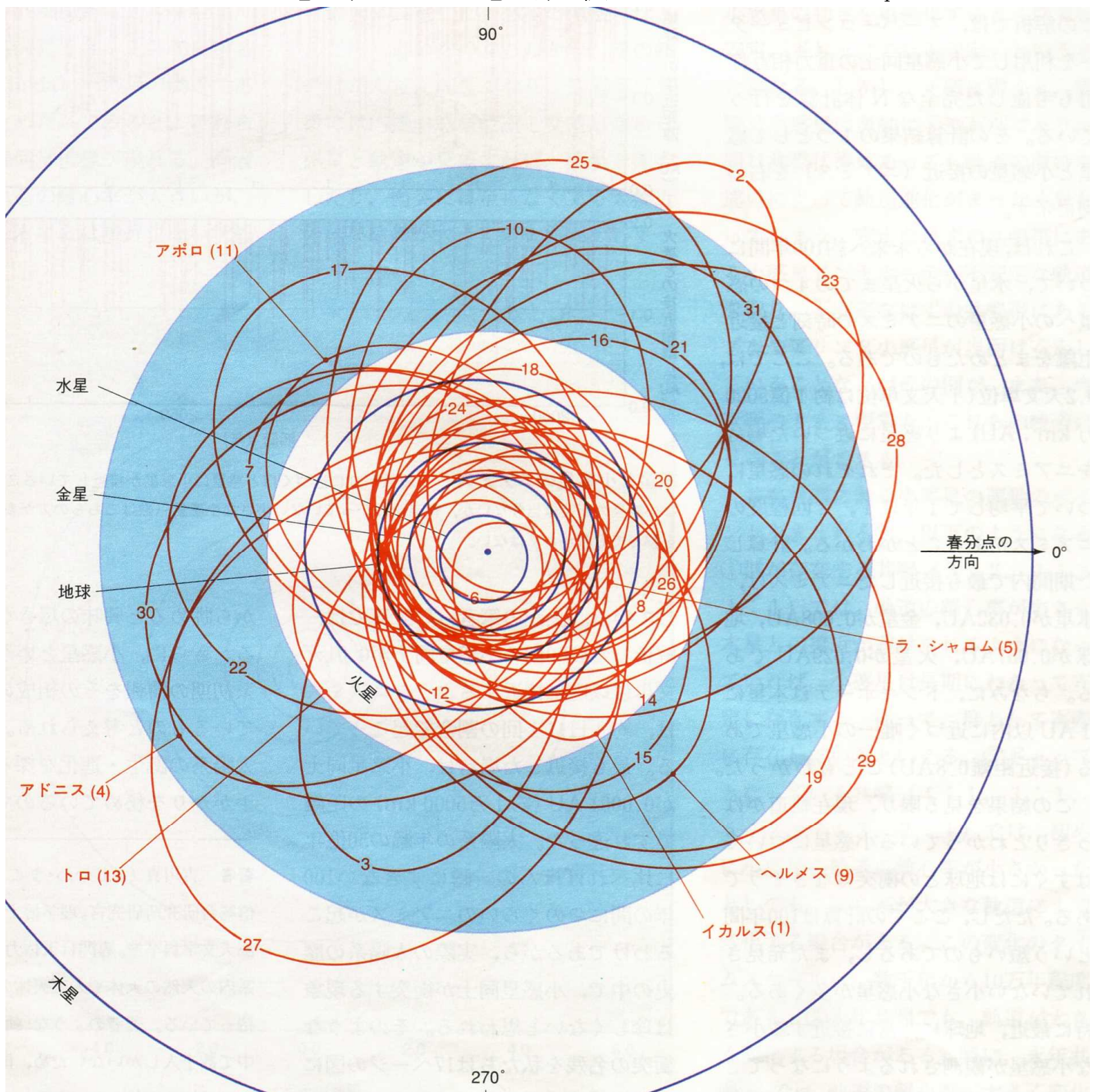
6. 小惑星帯 Asteroid Belt

下図の青の大きな円は木星の軌道、中心が太陽でそれを取り巻いて水星、金星、地球、火星の軌道が青で同心円状に描かれています。

火星と木星の間に薄青色の幅広のリングが描かれていますが、これが小惑星帯です。

位置的にはここに太陽系第5惑星が出来たのですが、木星が急速に成長してその巨大な重力で干渉したため、惑星の元になる微惑星の運動量が大きくなり、互いに衝突しても重力で集積して惑星にまで成長することができず、微惑星のままで残ったものです。残りは太陽系の惑星公転軌道面から取り除かれてしまいました。惑星軌道に関する「ボーデの法則」によれば、太陽から 2.8AU の軌道に惑星が在るはずだと予想され、探索の結果、1801 年に小惑星セレスが発見されました。以来、200 年間で約 18,000 個の小惑星が発見され、約 5,000 個の軌道が確定されています。

小惑星帯とアポロ小惑星群の軌道 (日経サイエンス 1992/10、p22)



直径 100 km以上のものが約 200 個、直径 30 km以上のものが約 1,000 個あります。直径の大きい順にセレス 933 km、パスラ 523 km、ベスタ 501 kmで、この三つの質量の和が小惑星帯全質量の凡そ半分を占め、地球の質量の 0.05%に相当します。

小惑星それぞれはバラバラに勝手放題の軌道を進んでいるように見えますが、これは長年の間に木星や土星の重力の影響を受けて軌道を乱されたためで、これら惑星の影響を取り除く軌道計算をすると、幾つかの軌道を持つ“族”グループに分類することができます。現在では“族”中の最大の小惑星の名を取って、テミス族、コロニス族、ウオス族などと分類されています。

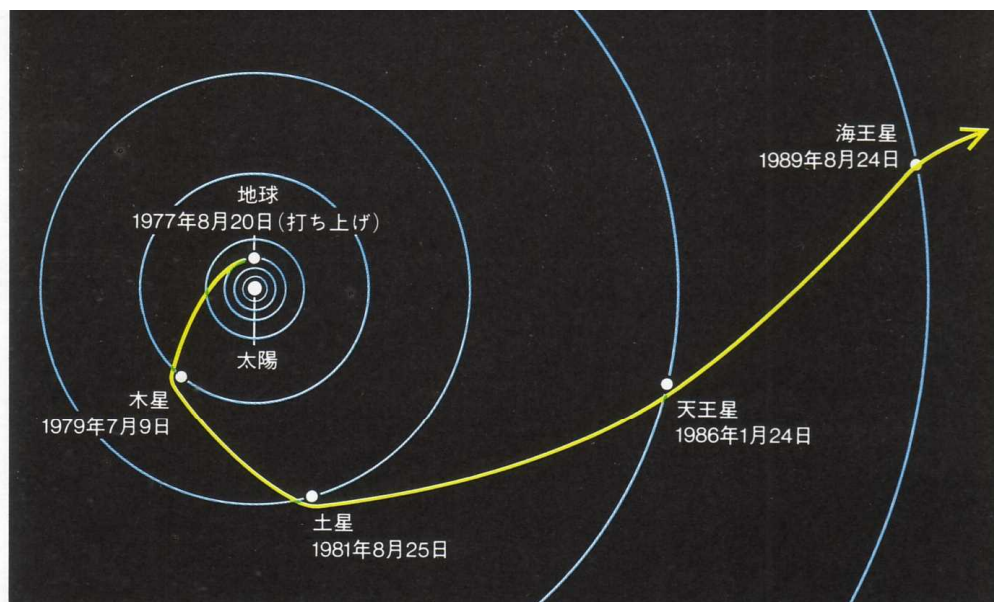
最近、発見されたカリン族は、その軌道計算から約 580 万年前に衝突・分裂したと推論されています。

前頁の図の赤の軌道は地球の軌道と交差するアポロ型小惑星の上位 30 個を示したものです。これらの小惑星の寿命は1千万年から1億年で、何れ内惑星の重力により捕獲されて衝突するか、加速されて太陽系外に飛ばされてしまいます。そして小惑星帯から欠員を埋めるかのように新しい小惑星が供給されてきます。

6,500 万年前に恐竜時代を終わらせた 10 km級のチチュルブ小惑星のように、過去から何回も地球は小惑星の衝突を受けています。小惑星衝突から地球を守る活動で世界的なものは、NASA の「スペースガード・サーベイ(Spaceguard Survey)」です。日本を含む多数の国々が参加して、担当星域を毎夜掃天観察し、地球近傍を通る可能性があるkm級の大きさの天体を隈無く調べ上げています。元宇宙飛行士のシュワイカート博士が主宰する「B612(「星の王子さま」に出てくる小惑星)財団」は小惑星衝突の危険性の世界的啓蒙運動を行い、近年、人々の関心は高まりつつあります。ハワイのマウイ島のハレアカラ山頂では、米国政府が建設したパンスターズ天文台の1号望遠鏡が2008年から毎夜約36万個の星を観測して小惑星の軌道計算を行う事業を開始しました。数年内に4号望遠鏡まで稼働させ、精力的な観測を行う計画です。

現在のところ、人類は衝突コースにある小惑星を逸らせる技術を有していませんが、太陽電池とイオン推進器を長時間稼働させるスラスター方式など、各種のアイディアが提案されつつあります。今後、地球の温暖化対策と併せて、活発に各種の事業が行われると期待できます。

ここから外惑星に入りましょう。右図は外惑星を利用して、ボイジャー2号がスイングバイ航法（惑星の近傍を通過して惑星の重力により惑星の公転速度で加速される航法）で四つの外惑星を訪ね、更に外宇宙へと加速されて出ていった軌道を示します。長期間にわたって非常に精密な軌道制御が行なわれたことが理解できます。ボイジャー1号、2号共に現在も稼働してデータを地球に送ってきており、今は太陽系の外縁に到達しつつあります。



ボイジャーの大航海 ボイジャーは、木星型惑星（外惑星）が176年に1回うまく並ぶ機会に、その重力を利用して次から次へと惑星を訪ね、探査した。最初は木星と土星を探査するように考えられていたが、後で天王星、さらに現在のところ太陽系でいちばん遠い海王星（冥王星は軌道の偏心率が大きいので今のところ海王星より内側にある）まで行けるように、遠隔操作で軌道が変更された。探査機は海王星の北極の上空を飛び、衛星トリトンを通過して、太陽系の南側へ飛び去っていった。

(「海王星」J.キノシタ／サイエンス 1990/1、p20)

7. 木星 Jupiter

右の写真はボイジャー 2 号が撮影した木星の表面です。二つの球体の内、左が衛星イオ、右が衛星エウロパで、イオの下に見えるのが木星の大赤斑です。

木星は太陽系最大の惑星で、ギリシャ神話の主神ジュピターを命名されただけあって、魅力に満ちた存在です。

太陽系の素材となった超新星の大爆発で残された残留物から重力で凝集が始まり、原始太陽系惑星円盤が形成され、中心部で原始太陽が輝き始め、その放射圧で太陽近傍のガス成分が吹き払われた時に木星は岩石を集めて惑星となり、その重力により惑星円盤の軌道の内側と外側のガスを集めて急速に成長しました。

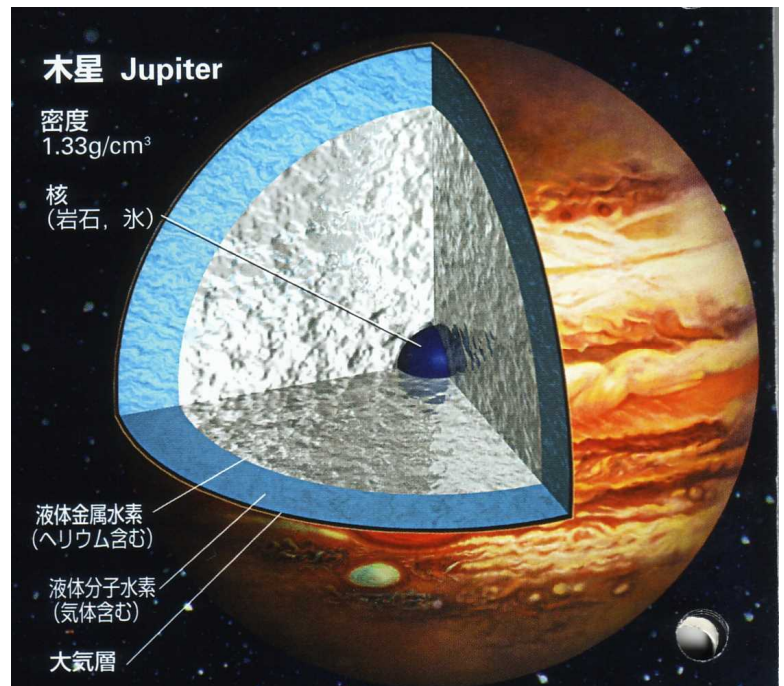
内部構造は右中図のように、中心部に比重が大きい岩石や氷を持ち、その外部にヘリウムを含む水素を集めています。その巨大な質量による強力な重力でガスは圧縮されてかなりの部分が金属結合した液体金属水素となっており、その外に液体水素をまとった構造をしています。

木星から外の惑星は、これと構造が似ているガス惑星となります。

木星 ($1.899 \times 10^{27} \text{kg}$) は地球 ($5.974 \times 10^{24} \text{kg}$) の 318 倍の質量がありますが、太陽 ($1.989 \times 10^{30} \text{kg}$) は木星 1,047 倍の質量があります。



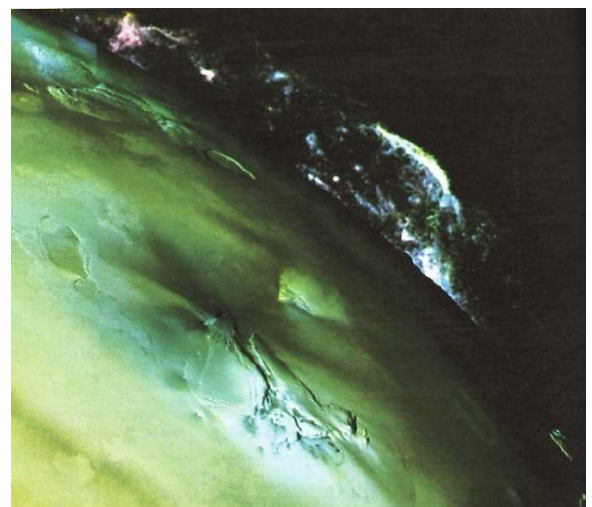
木星 (「ボイジャーの惑星探査」別冊サイエンス 76、表紙)



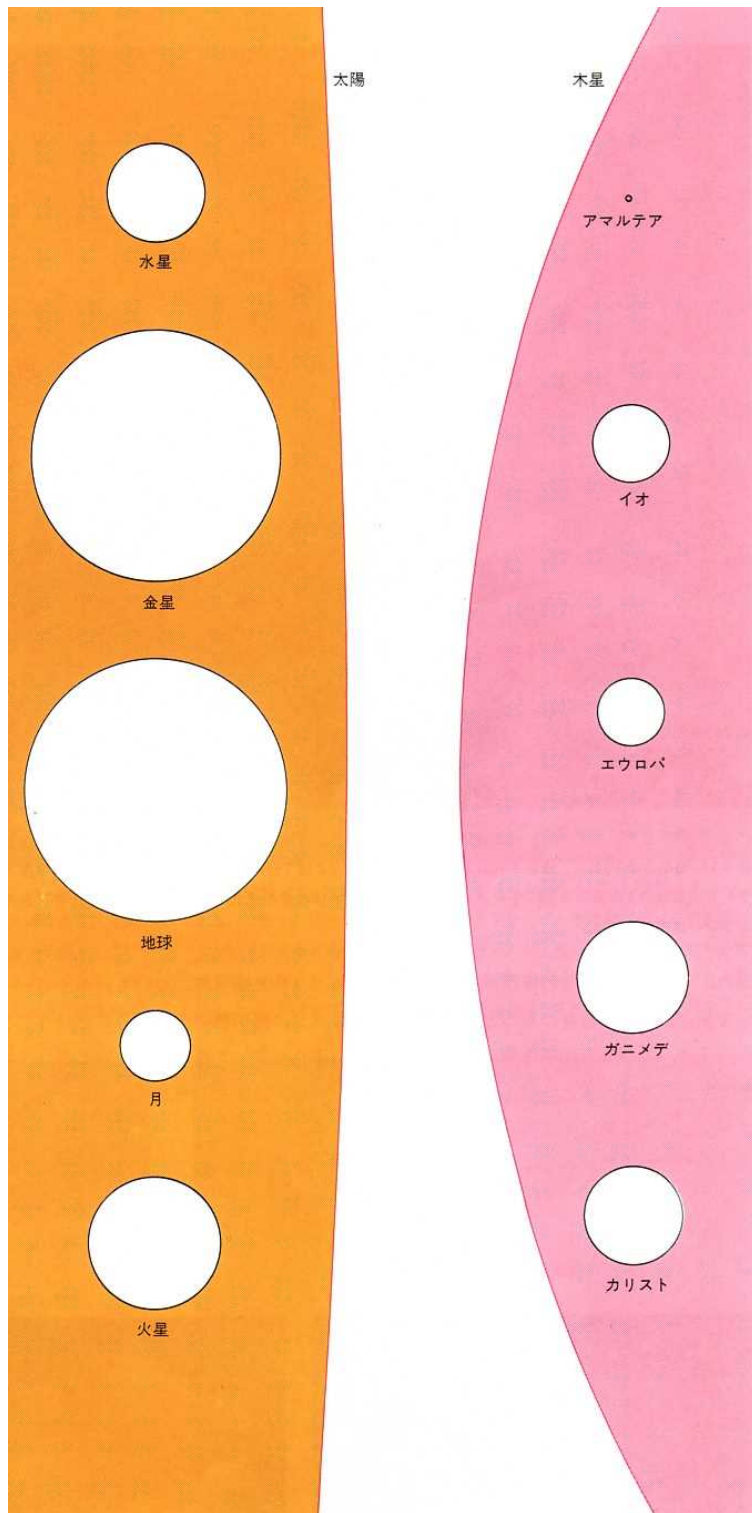
木星の内部構造 (Newton 不明、p30)

木星は 9.83 時間で自転しますから、赤道での自転速度は時速約 45,638 km で旅客機の 54 倍に及ぶ超高速です。この回転力で何本もの赤道に平行で進行方向に旋回する東向きと西向きのジェット気流が交互に生じており、その境界に前頁の大赤斑を始めとする多数の渦が生じています。特に大赤斑は 1655 年に発見されて以来存在し続けているようです。長径で約 40,000 km に及び、雲頂は約 8 km 盛り上がっています。

木星は魅力的な衛星を従えています。次頁左図に内側からそのサイズを示しますが、イオやエウロパは月と似た大きさであり、ガニメデやカリストは火星に近い大きさがあります。ガリレオが 1610 年からの木星の観測で発見したイオからカリストまでの 4 個を発見者に因んで特にガリレオ衛星といいます。



衛星イオの間欠火山ペレ
(別冊サイエンス 76、p46)



地球型天体と木星の衛星の比較

(別冊サイエンス 76、p31)

ガリレオ探査機(1995/12) の計測により、エウロパの密度は3.04で、中心は鉄のコア、岩石層(地殻)、氷の最外層からなる三層構造を成すと推論されます。地表のパターン等から、この氷の下には内部海が存在すると推定されます。7.5~5.8 億年前に全地球凍結が発生したと同じ状況です。イオに火山を作ったと同じ木星の潮汐力が内部を加熱して、氷の下に水があるようです。

前頁右下の写真のように、第2衛星のイオには衛星では初めて火山が発見されました。写真は間欠泉型噴出口ペレを横から見ており、噴煙の高さは約 300 km、イオ表面に直径 1,400 kmもの黄色と茶色の沈下物の同心環を作っています。このような火山は全部で 100 個所以上あります。

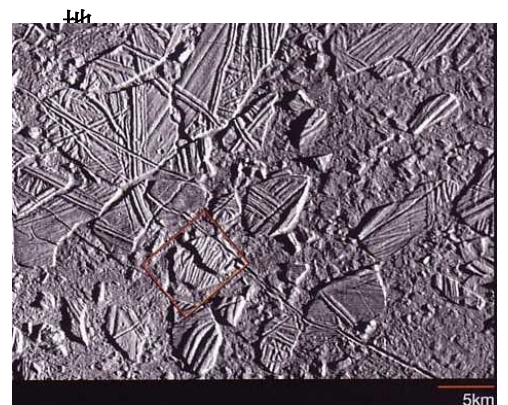
噴出物質は二酸化硫黄で、主な熱源は木星から受ける強大な潮汐力による加熱です。

木星には地磁気があり、イオを通る磁力線に沿って約 500 万アンペアーの電子線が流れているのも計測されています。不思議な物理現象の謎に包まれた衛星です。



エウロパ (別冊サイエンス 144、p91)

右上の写真の第3衛星エウロパも月位の大きさですが、暗い帯や線上の隆起が複雑な模様を描いています。拡大して見ると、右下の写真のように、明らかに巨大な氷のブロックが無数に見られます。



エウロパの氷のパターン

(別冊サイエンス 144、p92)

水があれば生命体の存在する可能性があります。エウロパをもっと詳しく調査するためと、ガニメデやカリストにも内部海の可能性が認められ、2011 年以降に JIMO (Jupiter Icy Moons Orbiter)計画として動き出す予定です。

木星には現在までに 61 個の衛星が発見されています。

第 4 衛星ガニメデは直径 5,262 kmあり、太陽系最大の月です。

8. 土星 Saturn

宇宙で「世界遺産登録」のような催しをすれば、土星の環は恐らく第 1 位に来るでしょう。1610 年にガリレオが望遠鏡で初めて発見して以来、人類を魅了し続けてきました。1979 年のボイジャー 1 号での観測以来、ハッブル宇宙望遠鏡、カッシーニ探査機他の多くの観測データが蓄積され、研究も随分進みました。それによると、環は無数の岩石や氷の粒子で出来ており、これらの粒子は互いに影響を及ぼしつつ、惑星を中心とする円軌道を回っています。

粒子密度の指標は「光学的深さ」と呼ばれ、環に垂直に入射した光りがどれだけ透過できるかを示し、土星の環の主要部である A 環と B 環では「光学的深さ」は 4 に達し、入射光の 2 % しか透過しません。

環を構成する粒子は直径 2 ~ 3 cm から数 m です。高密度の環の中では粒子同士が惑星を 1 周する間に数回衝突しており、衝突が起きると内側の粒子はより内側へ、外側の粒子はより外側へと軌道を変えて環は動径方向へと拡散して行きます。この過程を通して最初の形がどうであれ、環は惑星の赤道面に沿った薄い円盤形に落ち着きます。土星の環は巾が数十万 km に及びますが、その厚さは僅か数十 m しかありません。

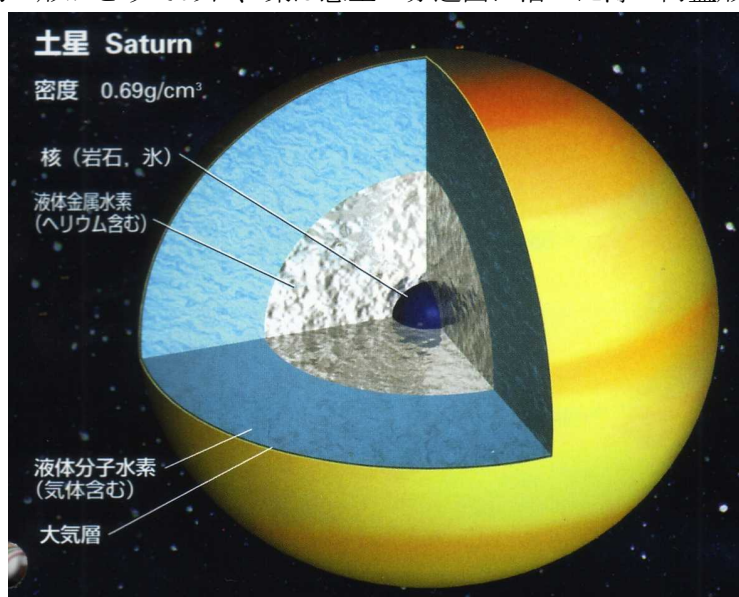
高密度の環は惑星の「ロッシュ限界」と呼ぶ範囲内に収まっており、この範囲内では惑星の潮汐力の方が環の粒子同士が重力により凝集しようとする力より強いために衛星になれません。「ロッシュ限界」のすぐ外には、不規則な形をした衛星と環が共存する領域があります。

土星の環については、次頁の図と解説を読んでください。木星、天王星、海王星等にも環が発見されています。

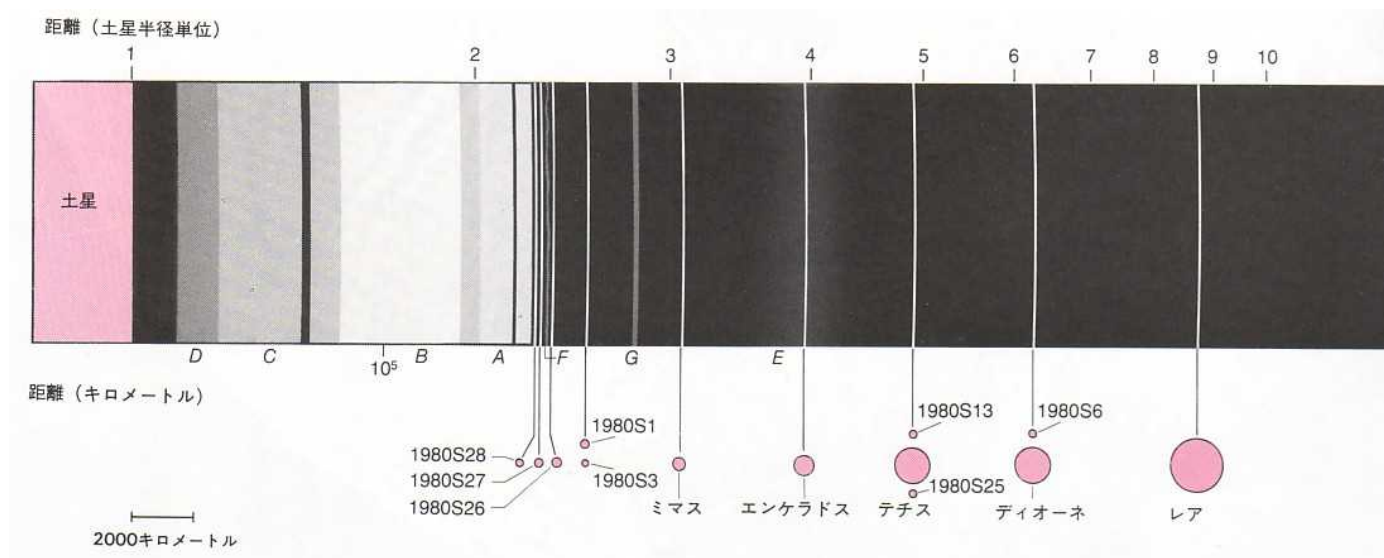
土星の内部構造は右図のように、木星と殆ど同じです。

木星に比べて質量が約 3 分の 1 であり、重力が

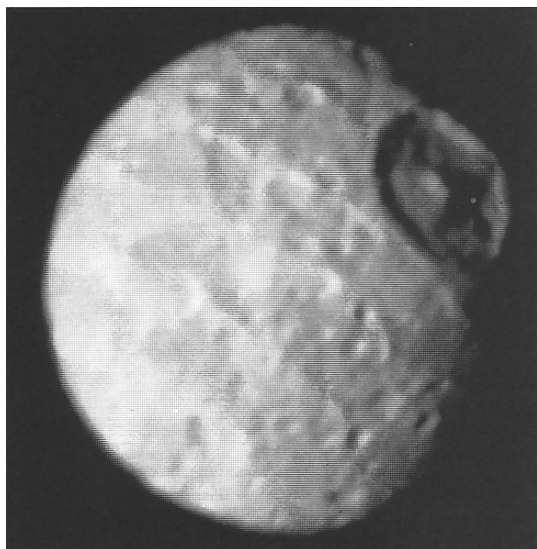
小さいため、比重が大きい液体金属水素層が少なく、密度が水より軽い 0.69 であることに注目してください。



土星の内部構造 (Newton 不明、p31)



土星の衛星 (別冊日経サイエンス 76「ボイジャーの惑星探検」、p78/日経サイエンス社 1986/3/24 刊)



ミマスの大クレーター

(別冊日経サイエンス 76、p87)

土星には 2009/10 現在までに 64 個の衛星が発見されており、53 個が命名されています。前頁下図「土星の衛星」には左の土星から衛星レアまでの距離を対数スケールで示しました。

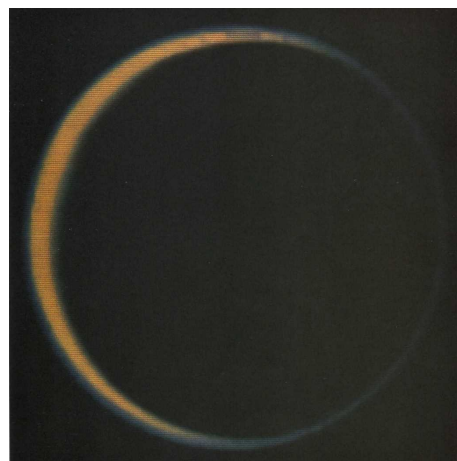
衛星ミマス（土星からの距離 185,520km、直径 392km、質量 3.80×10^{19} kg）には左の写真のように、特大級のクレーターがあります。「スターウォーズ」に出てくる「デス・スター」のようですね。

衛星ミマスが土星を 1 公転する間に 2 公転する位置にある土星のリングの物質は、常に同じ位置でミマスから引力を受けるために、その引力の影響が蓄積されてやがて軌道から外されてしまいます。これを軌道共鳴と呼び、このようにしてできたリング上の何もない領域がカッシーニの空隙です。

衛星 1980S1 と 1980S3 の平均軌道半径はそれらの直径の和ほども違っていません。内側を走る衛星はゆっくりと外側を回る衛星に追いつき、相互の引力のため内側の衛星は角運動量を獲得して大きい方の軌道に移って速度を緩め、外側の衛星はその分の角運動量を失って小さい方の軌道に移って速度を増します。このようにして、この二つの衛星は 4 年に一度その軌道を交換しています。

衛星エンケドラスはカッシーニ探査機により半球は隕石孔だらけで古いが、半球はつるつるで新しく、割れ目のような幾つかの筋が入っており、そこから数千km上空まで凍った水蒸気を噴出していることが判明しています。今後、研究が進めば、興味深い情報がもたらされるでしょう。

第 8 衛星テチスと並ぶ 1980S13 と 1980S25 はテチスに対して同一軌道上を土星を頂点として前後に 60° のラグランジュポイント L4 と L5 と呼ばれる軌道安定位置を同一速度で移動しています。



タイタンの大気

(別冊日経サイエンス 76、p93)

右の写真は第 14 衛星にして太陽系第 2 番目の直径 5,151 km を有する月であるタイタンを夜の側から撮影したものです。

タイタンの比重は 1.9 で、岩石 52%、氷 48% から構成されています。

オレンジ色の三日月は地表 200 km のエアロゾル(微少浮遊粒子)による太陽光の反射光を示します。表面重力は地球の 0.14 倍ですが、大気圧は 1.5 倍あり、ボイジャーの分光計による計測の結果、その 82~94% は窒素、約 12% がアルゴン、次いでメタン、水素、エタン等より成るとされています。表面温度は -180°C です。

この圧力と温度はメタン(CH_4)の三重点(気体、液体、固体が存在できる条件)に近いのです。

地球大気の場合は水の三重点に近かったので、生命の誕生の“場”を提供しました。タイタンではメタンが地球の水の役割を担って、メタンの海の中に生命が発生している可能性があると考えられます。

A環（想像画）



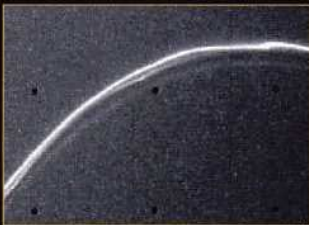
直径数 m の雪玉が飛び交っているイメージイラスト。環の中には衛星の作用でできた間隙もある

エンケの間隙



小さな衛星パンがこじ開けた間隙

F環



数本の糸がより合わされたようなF環には、近くの2衛星の引力でできた結び目もある

エビメテウス

ヤヌス

パンドラ

パン

アトラス

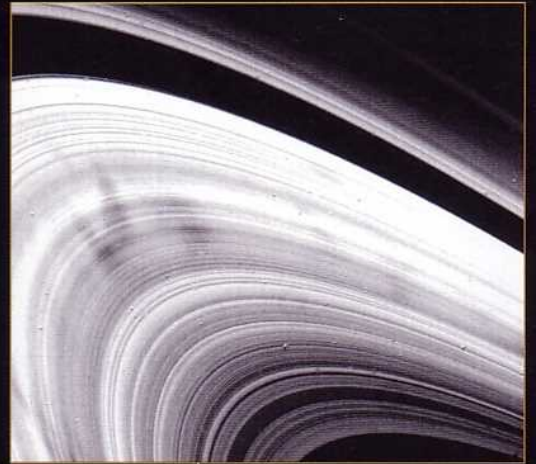
プロメテウス

エンケの間隙

カッシーニの間隙

ミマス

B環

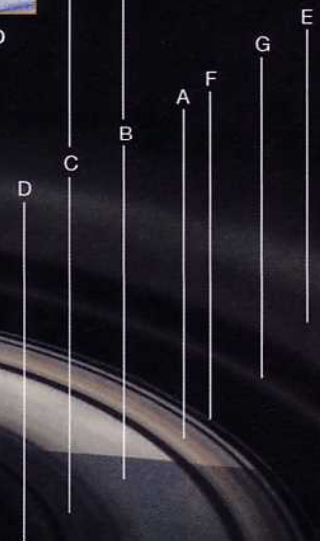


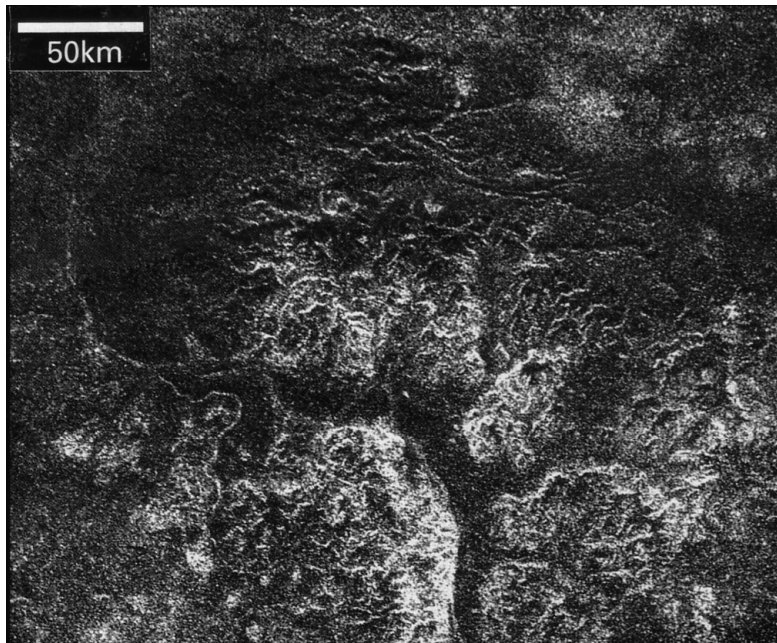
環を横切る形で見えている模様は浮遊する塵でできたにじみで、短期間に現れては消える。無数の小環についてはまだ完全には説明がついていない

C環



この画像はC環（青色）とB環（金色）の色の違いを強調してある





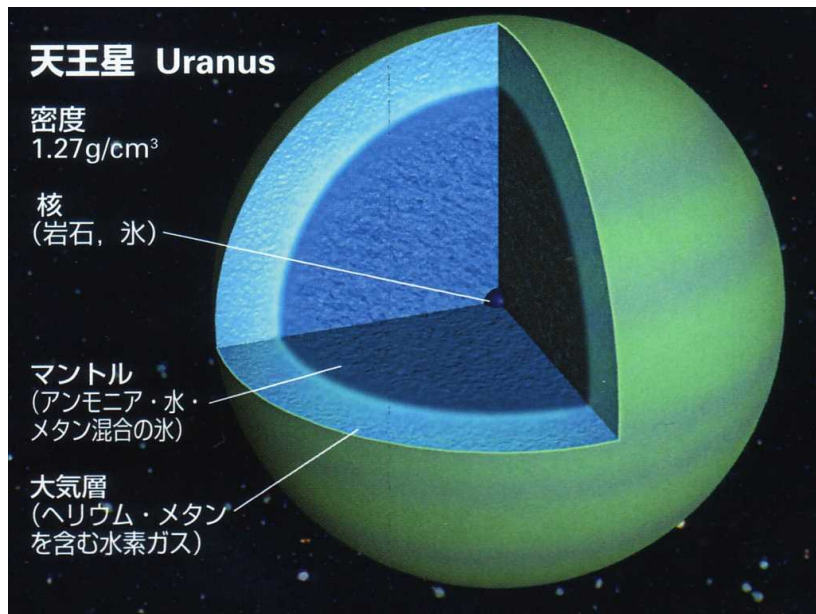
上の画像は、カッシーニがレーダーでとらえたタイタンの峡谷地形である。高地（画像右側）から低地（画像左側）へ液体メタンが流れることによってできたものだと考えられている。画像の下側にみられる明るい地形は、高い崖やこわれた岩盤などではないかと考えられている。タイタン表面には、同じように液体が流れてできたと考えられる地形が数多く発見されている。

タイタンの峡谷の地形

(Newton2009/11、p59)

2004/12/24 にカッシーニ探査機から切り離されたホイヘンス探査機が翌年 1/14 にタイタンの濃い大気に突入し、パラシュートで減速しながら降下中に観測を開始し、着陸後も凍結するまでの1時間半にわたり画像データを送り続けました。降下中に黒い川が滑らかな平地(海?)に繋がっている光景が送られて来ています。カッシーニ探査機も極地方に多数の湖を発見しています。メタンが液体として振る舞い、地球における水の役割を担っていることは事実です。太陽から遠く離れた場所で、物質や温度は違っても、地球と似た風景が出現し得ることが確認されました。

9. 天王星 Uranus



天王星の内部構造 (Newton 不明, p31)

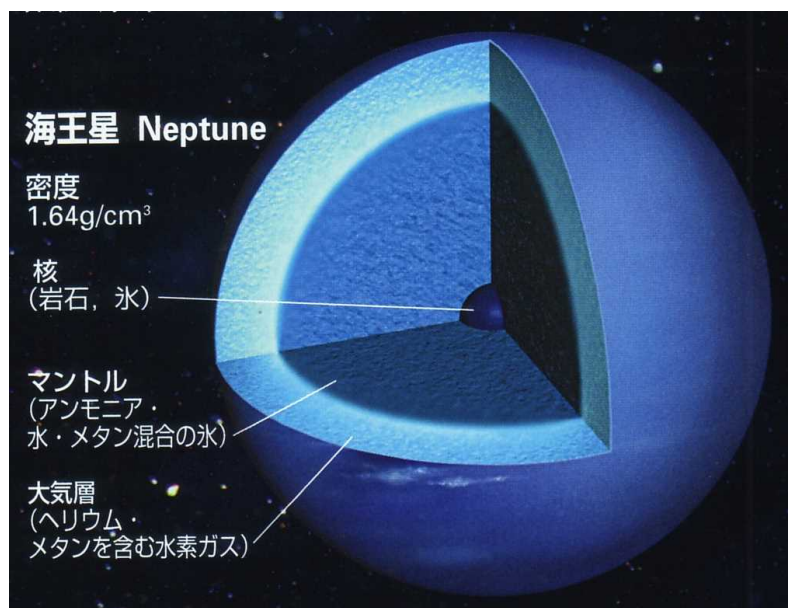


天王星の環

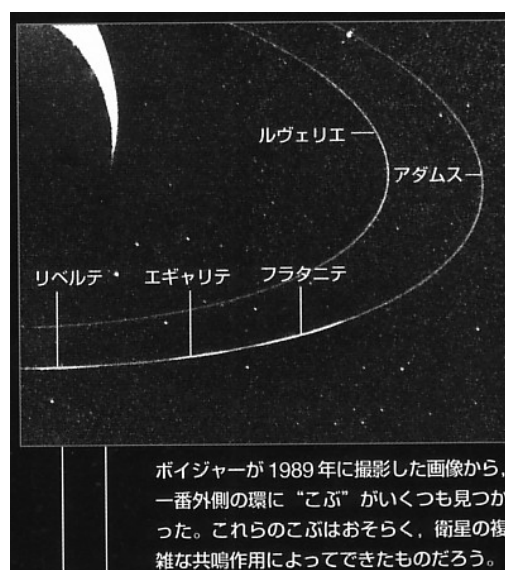
(別冊サイエンス 144, p109)

古代中国には陰陽五行説という世界観がありました。世界を構成する要素は木・火・土・金・水の五行であるとするものです。古代から知られた惑星の命名には、これらが割り振られました。土星まで来て使い果たし、その後の命名は西欧風になっています。シミュレーションによると、太陽系の外側に行くに連れて惑星形成に時間が掛かり、天王星が成長する時点では、周囲の空間からはガスが消失しつつありました。このため、天王星や次の海王星は十分なガスを集めて木星や土星のような巨大ガス惑星になることが出来ませんでした。天王星は左図のように小さな核とアンモニア、水、メタン等の混合物の氷のマントルと、ヘリウム、メタンを含む水素の大気層を持つ3層構造になっています。

現在までに発見された天王星の衛星は 27 個、土星のような環も有しています。奇妙なことに、天王星の自転軸は公転軌道面に対して $82^\circ 5'$ と殆ど横倒しであり、その衛星と環の自転軸は天王星の自転軸に対して更に若干傾いています。他の天体と衝突してその角運動量と破片を貰ってこのようになったと考えられますが、まだ、研究が進んでいません。



海王星の内部構造 (Newton 不明、p30)



海王星の環

(別冊サイエンス 144、p110)

海王星は天王星より 1.5 倍も太陽から遠い位置を公転していますが、惑星諸元は天王星とよく似ています。現在までに発見された衛星は 13 個、そして右上の写真のように環も持っています。

最大の衛星トリトンは太陽系で 7 番目の直径 2,706.8 km を持つ巨大衛星ですが、大きい衛星としては唯一の逆行回転公転軌道を有しており、このため、天王星からの潮汐力でブレーキが掛かり、軌道を下げつつあり、およそ 2 億年後には海王星の「ロッシュの限界」に入って潮汐力でバラバラに分解される運命にあります。恐らく近傍を通りかかった小惑星が、海王星の重力に捕らわれてこのような状態に入ったのでしょう。

トリトンの大気には濃厚なメタンが発見されており、研究者はメタンの海があるだろうと予想しています。

1 1. 彗星の故郷：エッジワース・カイパーベルトとオールトの雲

以上で太陽系の8惑星についての説明を終わります。

従来はこの他に冥王星(Pluto) が第9惑星として取り扱われていましたが、2005年夏に冥王星より大きなエリスの発見が公表され、「国際天文学連合(IAU)・惑星定義委員会」が編成・討議し、第3頁の定義を決め、2006年夏にIAU総会で冥王星を準惑星と格付けし、現在はエッジワース・カイパーベルト天体 EKBO

(Edgeworth-Kuiper Belt Orbiter)の一つと分類されています。

EKBO は2006年時点で1,000個以上発見されています。



ハレー彗星 (Wikipedia)

彗星は惑星と同じく太陽を一つの焦点とする楕円軌道を描きますが、この内、周期が200年未満のものを短周期彗星、200年以上のものを長周期彗星と分類します。右上のハレー彗星は75.3年の周期を持つ短周期彗星で、写真は1986/3/8の撮影です。次の出現は2061年夏と予定されています。

人類との付き合いは長く、前240年、史記の始皇本記や前164年のバビロニアの記録に現れています。



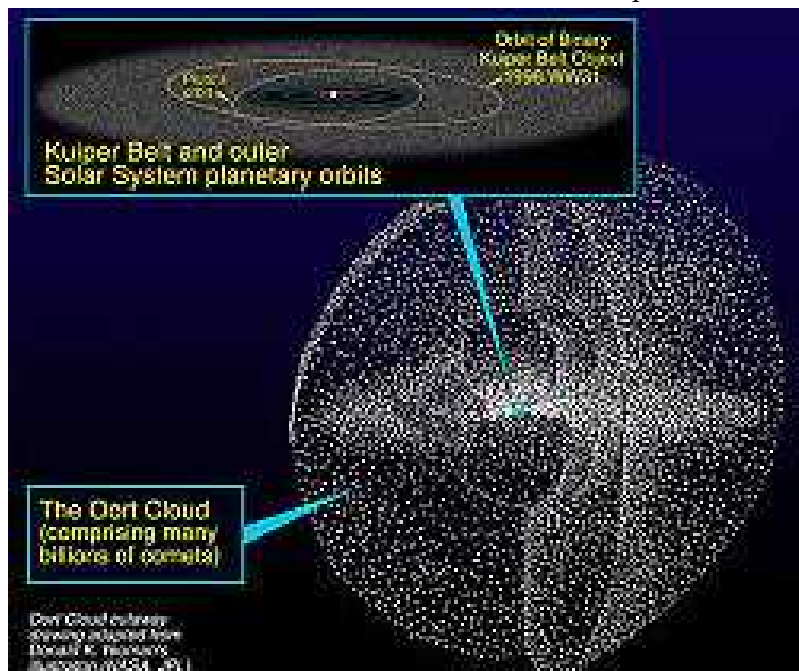
ヘール・ボップ彗星 (別冊サイエンス 144, p136)

左の写真は1997/3地球に最接近したヘール・ボップ彗星で、前回の回帰は4,200年前、次の回帰は木星の重力の影響を受けて2,600年後になります。

彗星は氷と塵を主成分としており、「汚れた雪玉」だといわれますが、太陽に接近すると太陽光線の放射圧により揮発成分が蒸発してあの美しい尾をなびかせます。短周期

彗星は何回も太陽に炙られて揮発成分が減少していますが、長周期彗星は揮発成分が豊富で見た目に豪華です

短周期彗星は殆ど太陽系の黄道面(惑星の公転軌道面)をその軌道面としており、左図の水平円盤状のKuiper Belt からやって来ます。エッジワース・カイパーベルトは狭義には遠日点が30~48AUに到るもの、広義(散乱エッジワース・カイパーベルト)には遠日点が48~400AUとされています。



カイパーベルトとオールトの雲 (Wikipedia)

長周期彗星はあらゆる方向から現れ、ヘール・ボップ彗星は黄道面にほぼ垂直な軌道面を有します。これらは右図の球状のOort Cloud からやって来ます。

太陽の重力の外縁がオールトの雲の外縁となります。

この外は太陽以外の恒星の重力の勢力圏となります。

第 1 ～ 1 1 章で参考にした文献：

「別冊サイエンス 76：ボイジャーの惑星探査」／日経サイエンス社 1986/3/24 刊

「別冊サイエンス 144：驚異の太陽系ワールド」／日経サイエンス社 2004/2/25 刊

「NEWTON SPECIAL：太陽系グランプリ」／ニュートン・プレス社(不明)刊、他

「新しい太陽系」渡部潤一／新潮新書／新潮社 2007/11/20 刊

12. 太陽 the Sun

太陽の直径は 1,392,000 km で地球の 109 倍、重量は 1.989×10^{30} kg と地球の 33 万倍あり、太陽系の総質量の 99.9% は太陽が占めています。比重は 0.26 と軽く、表面重力は地球が 1G で太陽は 27.9G です。

テキスト「宇宙と物質」へ行くと判りますが、宇宙の中では太陽はありふれた恒星で、我々人類にとって有り難いことに、誕生から死まで凡そ 110 億年ある比較的長命な星です。

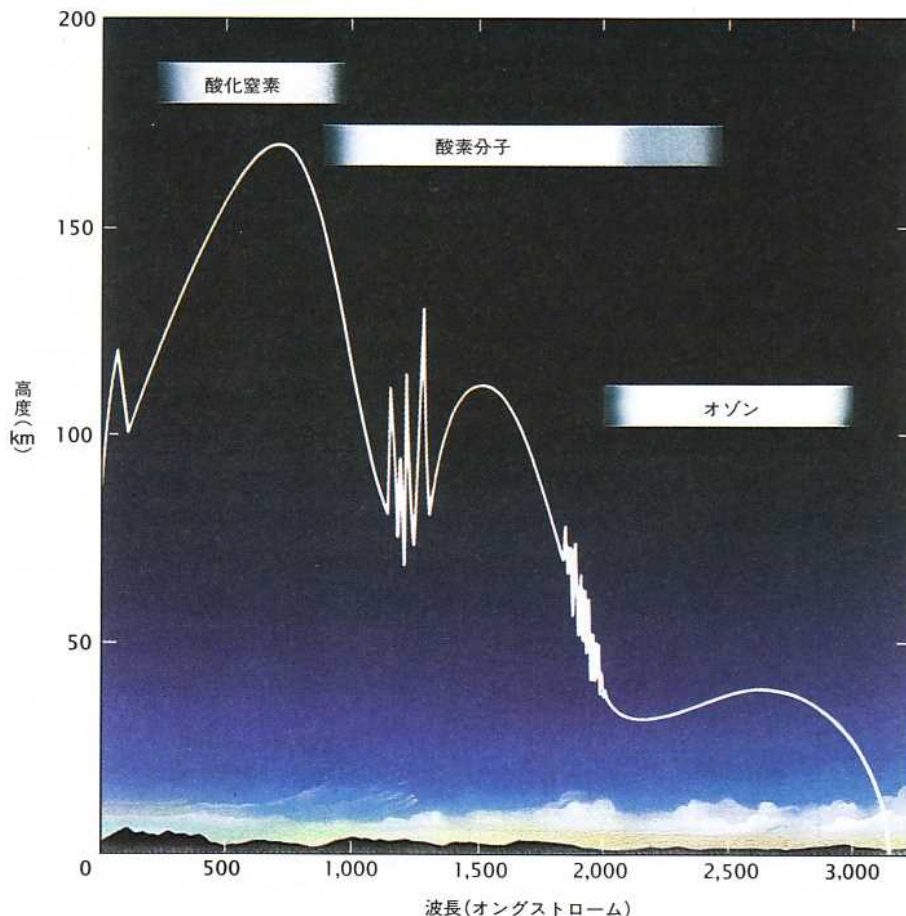
「地球と生命」で述べたように、太陽系の誕生は約 45 億年前、地球に最初の生命が芽生えたのは約 40 億年前、多細胞動物が現れたのが約 6 億年前、オゾン層ができて危険な紫外線が来なくなった地上に生物が進出したのが約 4.5 億年前、恐竜時代が去って闇の住人だった哺乳類が日中の世界に進出できたのが約 6,500 万年前、初期人類が現れたのが約 600 万年前、現生人類が現れたのが約 80 万年前、文字が発明され知識の集積が始まって人類というハードに文明というソフトが加わって社会的生物・人類の本格的進歩が始まったのが約 5 千年前、宗教の呪縛から解放されて科学・技術が急速に進歩し始めたのは僅か約 200 年前のことです。誕生時の太陽の放射エネルギーは現在の約 70% でしたが、この 45 億年間に現在の価にまで増加しました。今後も太陽は進化を続けて光量を増し、10 億年後には GAIA(地球・生命共生体)の力も及ばず、水蒸気による暴走加熱が始まって、地球も現在の金星に似通った環境になります。

まさにゴータマ・ブッダが説く「諸行無常」(この千変万化する場に不変で不滅のものは一つも存在しない)が世界の、宇宙の実相なのです。「長期的に見れば、全ての人は死ぬ」は真理ですが、「どうせ何時かは死ぬ身なら、他人に迷惑を掛けてもやりたい放題やって、自分だけ満足な虚無的な反社会的な人生でよいか」それともブッダが説くように「縁起(世界の真理)を知り尽くし、八正道(人としての社会倫理)を守る積極的な生き方がよいか」、ここに各人の人生観が問われます。

この章では太陽の現在の姿を説明します。太陽は変化し続ける存在です。過去の姿、未来の姿を知るには、「宇宙と物質」で述べる太陽の内部で起こっている原子核そのものの変化を知らねばなりません。太陽の過去と未来は、太陽もその一つである恒星の普遍的進化として「宇宙と物質」で取り扱しましょう。

太陽光線：「地球と生物」で初期の大量の炭酸ガスは炭酸塩として地中に固定され、シアノバクテリアの活動により、地球の大気中の酸素濃度が約 15% に上昇して大気上層で酸素からオゾンが作られ、オゾンにより太陽光線中の紫外線が阻止されて初めて地上が生物にとって安全な場所となり、生物が地上に進出できたのが 4.5 億年前だと述べました。

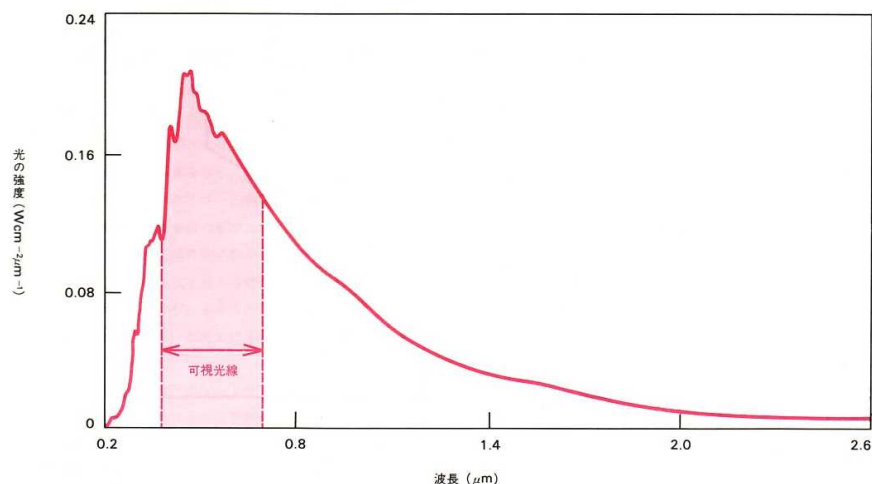
右図は現代の大気による紫外線の吸収の様相を示した図です。紫外線とは波長 10~300 nm (100~3,000 オングストローム、0.01~0.3 μm) の光線(電磁波)のことです。(注: nm = nano meter = 10^{-9} m、



紫外線の強度半減高度 (サイエンス 1990/4 号 p30)

$\mu\text{m} = \text{micro meter} = 10^{-6} \text{ m}$ 、オングストローム $= 10^{-10} \text{ m}$)

横軸は光線の波長、縦軸は強度が半減する高度を示します。太陽からの紫外線の殆どが、地表に達する前に「酸化窒素 NO_x 」「酸素分子 O_2 」「オゾン O_3 」により取り除かれていることが判ります。



地表の太陽光線のスペクトル分布 (サイエンス 1990/4 号 p30)

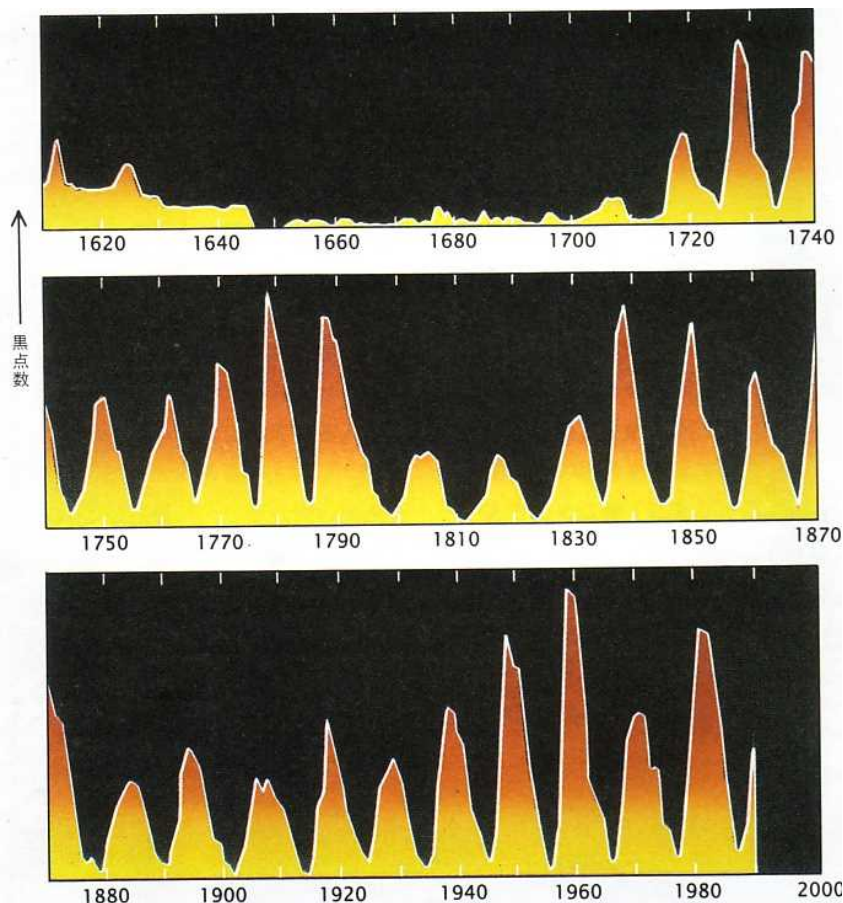
左図は地表で受ける太陽光線のスペクトル分布(横軸は波長、縦軸は強度)を示します。人類の視覚は 450 nm、550 nm、620 nm 付近にピーク感度を持つ青、緑、赤の3色の光センサー(錐体視細胞)を有しており、左図で可視光線として示している約 300 nm～720 nm (0.3～0.72 μm) の範囲の光(可視光線)を見ることが出来ますが、これは地表で受ける太陽光線の強度が高い領域に見事に一致しています。

我々が太陽と地球が与えてくれた環境に適応して進化して来た生物であることがよく判るでしょう。

太陽の黒点：太陽は安定で変化しないように見えますが、実際には週単位で太陽定数(放射する光線の全体量)は 0.2% 程度変動しています。この変化は地球の平均温度に対して約 0.1℃ の変化を与え得るものです。

太陽の外観で最も判りやすいのは黒点です。望遠鏡が実用化された 1610 年頃からの太陽黒点(Black Spot) の出現数の記録を右図に示します。太陽の活動レベルは黒点出現数と密接な関係があり、少ない時期は平均気温が低く、多い時期は平均気温が高いと統計データは語ります。黒点出現数の周期は約 11 年です。

右図で 1645～1715 年は殆ど黒点が出現しなかった時期であり、歴史に残る 1315～1860 年の小氷期(Little Ice Age) の中でも特に寒さが厳しく、「夏が来なかった時代」として知られる「マウンダー極小期」です。その時代は世界的に大飢饉が起き、栄養不足と日照不足でペスト他の病気が大流行し、経済恐慌が発生しました。英国ではチャールズ一世の首を刎ねた 1642～1649 年のピューリタン革命、ヨーロッパ全土ではドイツの人口が 1,600 万人から 600 万人にまで激減した 1618～1648 年の 30 年戦争など世界史に残る残酷な戦争や革命の時代でした。

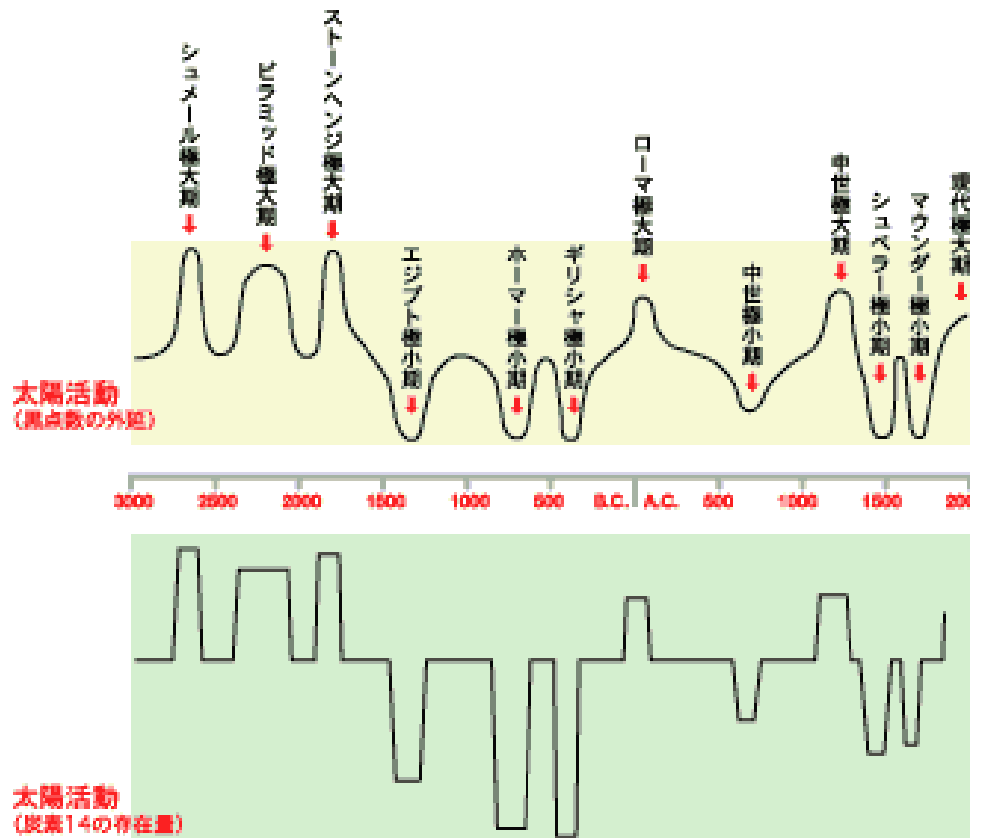


太陽黒点数の変化 (サイエンス 1990/4、p26)

右図は炭素 14 法と呼ばれる普通の炭素 $^{12}_6\text{C}$ に対する放射性同位体 $^{14}_6\text{C}$ の比率が多い時期は太陽活動が活発であることを利用して、古代までの太陽黒点数の概算を行ったグラフです。大局的に見て、炭素 14 が平均より多い時期は人類の文明興隆期と重なり、炭素 14 が平均より少ない時期は人類の文明衰退期と重なる様相が窺えます。

結局のところ、我々人類は太陽というお釈迦様の掌の上で飛び回った孫悟空のような存在なのでしょう。

下図は 10 世紀以後の宇宙線照射量・太陽活動度・平均気温の関係を表わしています。

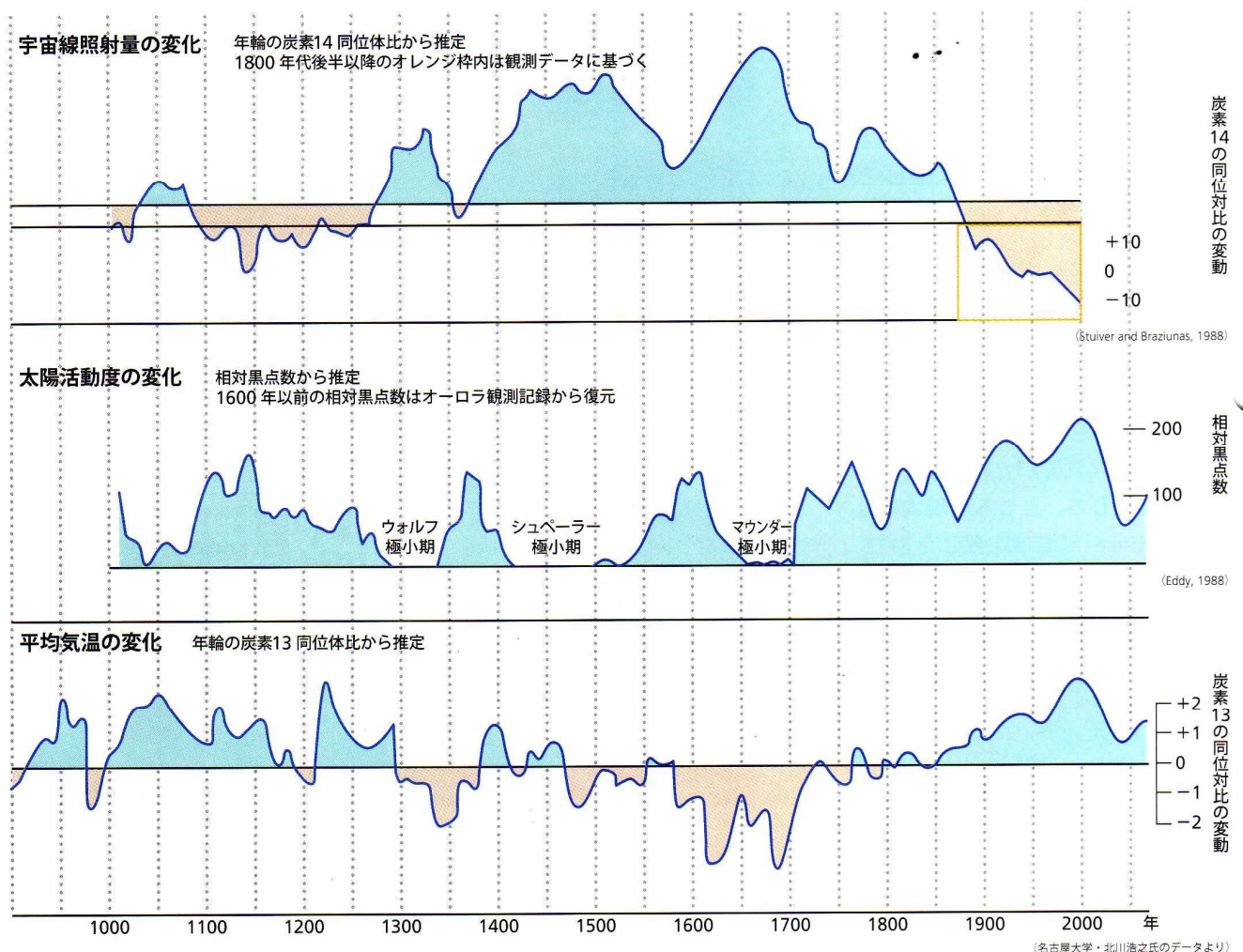


太陽活動と人類文明の興亡

(「地球が寒かった時代」J.A.エディ／サイエンス 1984)

丸山氏が示す太陽活動と宇宙線、気温の相関関係 3者の変動を調べてみると、太陽活動が活発な時期には宇宙線照射量が減り、気温が高い傾向が見られる。今後約 50 年は丸山氏による推定値。

日経サイエンス 2008 年 8 月号



2008/5月の日本地球惑星科学連合大会で丸山孝典東大教授が用いた図表で、太陽活動度が低下すると太陽の磁力線が弱まって太陽系圏外からの高速荷電粒子が太陽系に侵入し易くなり、この宇宙線照射量の増加が水滴の核となって雲の発生を増加させ、雲が太陽光線を反射させて平均気温が低下するという三者の関係を表わしています。丸山教授は「雲が1%増えると地球の平均気温は1℃下がる」と述べています。このメカニズムはデンマークのHenrik Svensmarkが提唱したもので、学会でも論争があり、現在のところ必ずしも主流の理論とはなっていませんが、図で見る通りの三者の高い相関性は注目に値します。

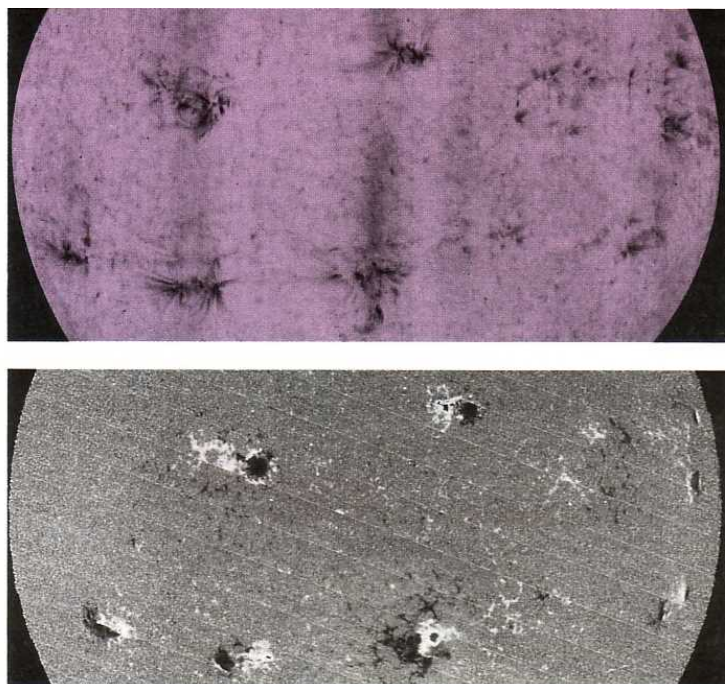
黒点とは何なのでしょう。太陽の光球面(表面)温度は $5,780^{\circ}\text{K}$ ($=^{\circ}\text{C}+273$:ケルビン温度)、黒点は約 $4,000^{\circ}\text{K}$ で、黒点は周囲より低温であるために黒く見えます。黒点は太陽内部の磁力線が集まった磁力管が太陽表面から一旦出て、また入る場所に出来ます。そのため、ほぼ赤道方向に必ず対になって現れます。

黒点はどのように出来るのでしょうか。ここで太陽特有の条件を挙げて、黒点が発生する機構を説明します。

- (1) 太陽では高温状態で物質(主に水素とヘリウム)は原子核と電子がバラバラに勝手に動き回るプラズマという状態になっています。

プラズマは電気の良導体です。

- (2) 太陽の赤道は27.28日、緯度75度で31.8日で1回転し、その間の緯度では滑らかに変化する自転速度となります。その動きは光球面から太陽半径の深さ30%位まで及びます。ほぼ6ヶ月で赤道は極の自転を1回転追い越します。

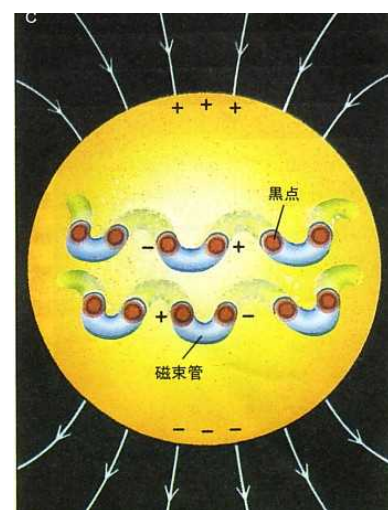


黒

点と磁気分布 (サイエンス 1990/4、p26)

- さて、①太陽が自転すると内部に数十億アンペアの巨大な電流が発生し、南北の極方向に1ガウス程度の磁界が出来ます。②南北方向の磁界による磁力線は極よりも自転速度が速い赤道のプラズマに引き摺られて③3年後には6回ほど巻き付くことになります。④巻き付けば同じ断面積の中により多くの磁力線が通り、磁力管の磁束密度は高くなります。⑤赤道部を中心に引き伸ばされて狭い領域に並行して走る磁力線は互いに反撥し合いながら部分的に光球面から浮き上がります。⑥光球面を磁束管が横切った面では導電性が高いプラズマは磁力線に沿ってしか動けず、周囲の光球面より活動が制限されているために温度が低くなり、暗くなります。

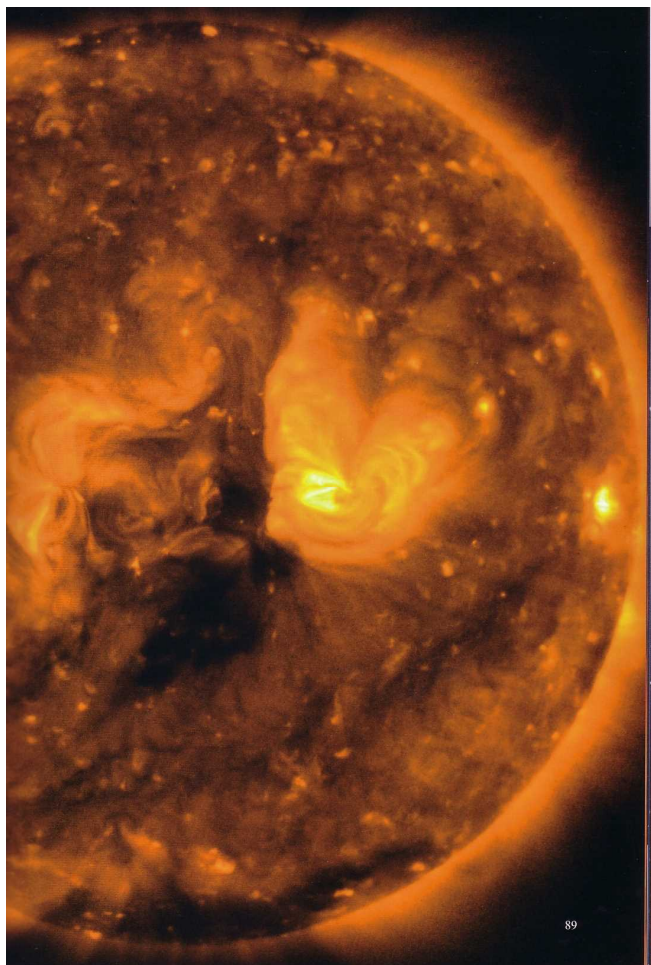
前頁右下の「黒点と磁気分布」の上の図は光学望遠鏡で見た光球面、下の図は同じ位置を磁気センサーであるマグネトグラフで観測したものです。黒点のN極を黒色、S極を白色で示しています。磁束密度は3,000ガウス程度と地磁気より3桁上です。右図は赤道に巻き付いた磁力管が所々で光球面から浮き上がる様相を図式化したものです。



磁束管と黒点の関係

(サイエンス 1990/4、p28)

太陽のその他の活動： 左下の写真はX線観測による太陽の外観、右中の写真は光球面の平穏な個所の「粒状斑」(各斑の大きさは約 700～1,400 km) と呼ばれる微細構造を示します。



太陽の外観 (X線観測)

(「太陽と恒星」 p89)

右下の写真は 2000/7/19 「TRACE」(遷移領域・コロ

ナ観測衛星)が撮影したプロミネンス(紅炎)が 12 万kmまで立ち上がる途中の状況です。黒い部分は**プロミネンス** (「太陽と恒星」 p75)

約 2 万度、細いループは約 100 万度以上の高温です。

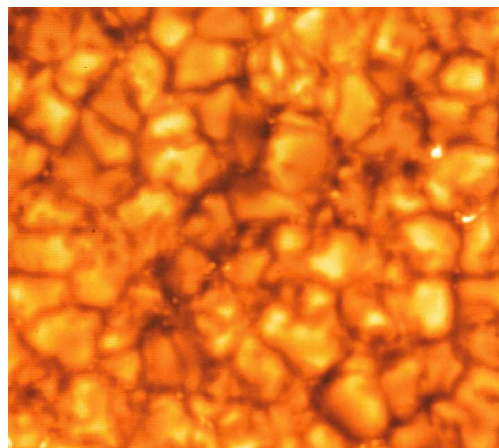
黒点の説明にあった 磁力線 の作用を受けている様相が判るでしょう。

磁力線は太陽の内部で作られ、外へ外へと押し出して光球面から出て消滅する瞬間に磁気エネルギーがプラズマを加速してプラズマを大量放出することがあります。次頁右の写真は観測衛星 SOHO が 2002/1/4 に撮影した「**コロナ大質量放出(CME)**」です。

中央の黒丸は遮光板、その上に描かれた白丸は太陽の位置と大きさを示します。

太陽の光球面温度は約 6,000 度なのですが、プラズマ集団であるコロナは新陳代謝する磁力線が消失時に解放するエネルギーを与えられて数百万度の高エネルギーを取得し、太陽の重力では捕らえきれなくて溢れ出てきます。それを「**太陽風**」と呼びます。太陽風は穏やかな時期は地球の地磁気に衝突すると磁力線に沿って地球の極に流れ込み、上空で大気分子と衝突して水素なら赤く、窒素なら青く大気を発光させ、我々はそれを「**オーロラ**」と呼びます。

太陽の中心温度は約 1,500 万度、そこから数十万年かけて熱エネルギーは光球面まで伝導して来ます。



光球面の粒状斑

(「太陽と恒星」 p92)



右の写真のような特大級のコロナ放出は、1回の太陽周期の特に黒点の極大期に20～30回程度起こっていますが、これが地球に向かえば「太陽嵐」になります。大量のプラズマが地球の地磁気圏に衝突すると、約1ガウスの地磁気を0.1%程度変動させる「地磁気嵐」を引き起こすことがあり、この変動が誘導する巨大な電流は地表の送電網やパイプラインなどの大規模電導体に大きな影響を与えます。例えば1989/3/13の地磁気嵐はカナダのケベック州一帯の電力を停電させました。大量のプラズマは大気上層の希薄な大気分子を加熱して大気圏を膨らませ、地球を周回する人工衛星の空気抵抗を増して予定より早く墜落させることもあります。宇宙ステーションの乗組員は、高速プラズマの衝突で誘発される放射能を避けるために、シェルター室に避難する必要があります。



コロナ大質量放出（「太陽と恒星」p81）

第12章で参考にした文献：

「太陽活動の地球への影響」P.V.フォーカル／サイエンス社 1990/4 刊

「別冊サイエンス 144：驚異の太陽系ワールド」／日経サイエンス社 2004/2/25 刊

「太陽と恒星」Newton／ニュートン・ムック 2008/1/15 刊

以上

補遺:

1. 太陽の兄弟星の探索が始まった

2003年に2個の隕石の硫化鉄中から鉄60(放射性の鉄)が放射壊変したニッケル60が発見された。

この証拠は太陽が誕生後180万年頃に5光年以内の近距離で超新星爆発があったため、移動中の恒星が偶然に太陽近くを通りかかって超新星爆発したと考えるよりも、巨大なガス雲から多数の兄弟星が創られて、その一つが超新星爆発したと考える方が自然である。

星団を構成する恒星では、最も多いのは太陽質量の1/10程の軽い星で、星の質量が10倍になると存在数は1/20になる。超新星は太陽の15~25倍の質量を有するが、そのような星1個に対し約1500個ほどのより軽い星が存在することになる。

星団全体の質量に対し大質量星が星団の中心部へ行ける時間の効果を考慮してシミュレーションすると、太陽が生まれた星団が含んでいた星の数は恐らく3,500個以下だった。この程度の総質量では球状星団に進化するには軽すぎて、形成の1~2億年後には散開星団となって銀河の同じ軌道上に散って行く。この星団は既に銀河を27周しており、銀河の半周に相当する範囲に散らばっている。これらの星は太陽に似た化学組成をしている筈だ。

欧州が打ち上げるガイア観測衛星は5年間で約10億個の星の3次元位置と速度を測定し、太陽から数千光年以内にある恒星全てを網羅した完璧なリストを作成するミッションを有する。そのデータの中から太陽が過去に辿った軌道近くや、これから辿る軌道近くから兄弟星を捜すことができる。(要約)

(「The Long-Lost Siblings of the Sun」 S.F.Portegies Zwart/SCIENTIFIC AMERICAN Novenver2009)

2. 太陽系外の惑星発見相次ぐ

2011年(平成23年)2月3日

2011年(平成23年)2月3日

太陽系外惑星1200個発見

NASA 54個、水存在の可能性

【ワシントン＝共同】米航空宇宙局(NASA)は2日、ケプラー宇宙望遠鏡を使って太陽系以外で約1200個の惑星とみられる天体を発見したと発表した。うち68個は地球と同サイズ、54個は生命に欠かせない液体の水が存在する可能性があるという。

これまでに地上の望遠鏡などで確認された太陽系外惑星の数は約500個で液体の水が存在できるのは2個とされる。今回の発見が最終的に確認されれば、地球外生命探しの対象が一気に増えることになる。

地球から2千光年離れた距離に、恒星の周りを6個の惑星が回る惑星系を発見したと、米航空宇宙局(NASA)の研究グループが3日付の英科学誌ネイチャーに発表した。

恒星回る6惑星

地球から2000光年

系外にある惑星を探すケプラー宇宙望遠鏡を使い、はくちよう座からこの座にまたがる領域を観測。惑星が恒星の前を横切る際のわずかな光の変化をとらえて惑星の存在を検知する手法で、恒星「ケプラー11」が6個の惑星を持つていることを突き止めた。

NASAが発見

惑星の半径は地球の約2・0〜4・5倍。ほぼ同一平面的な軌道で、内側の5個は恒星から非常に近い軌道を回っているという。

最も外の惑星の組成は不明だが、内側の5個はいずれも地球より密度が小さく、岩石と氷、ガスでできていると考えられ、地球よりは海王星に似ているという。

(ワシントン＝共同)

系外惑星がいっぱい

系統的な探索で続々と発見

・親星（天球上の位置を図示）

2012年9月9日現在で確認済みの系外惑星
（軌道は見やすいように誇張してある）

巨大ガス惑星 木星や土星に似た大質量惑星



ホットジュピター 親星に近い軌道を公転している大質量の惑星



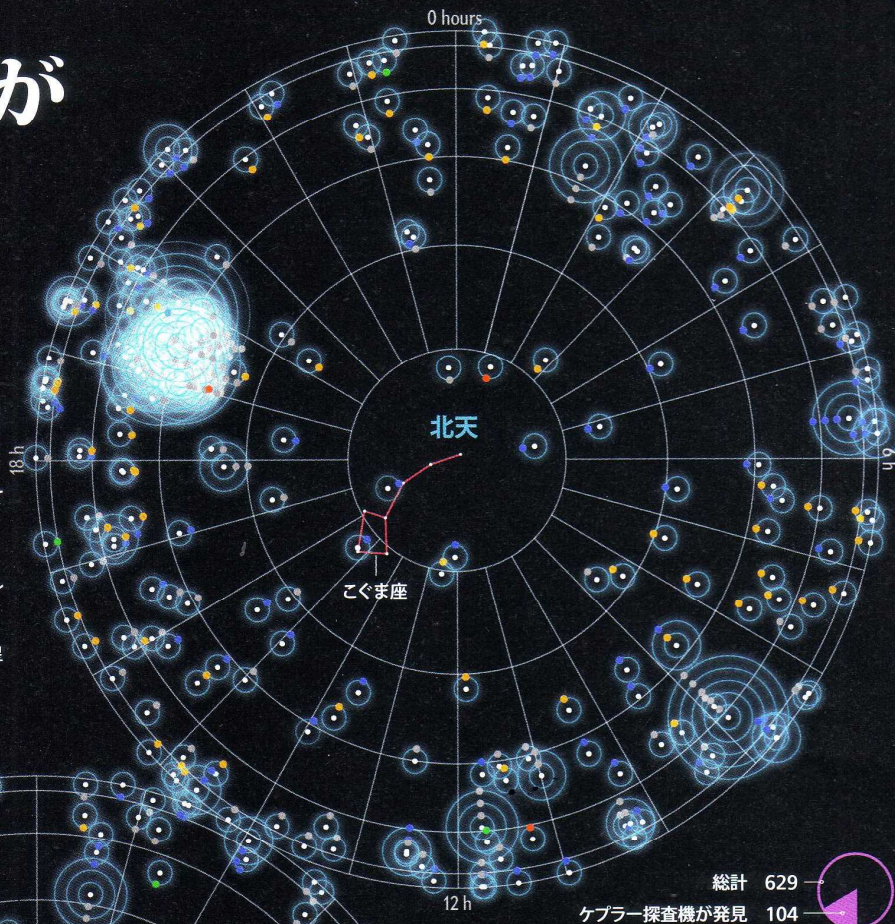
ホットネプチューン 親星に近い軌道を公転している中規模の惑星



地球型惑星 固体表面を持つ小振りの岩石惑星



不明 どのタイプがまだわかっていないもの



総計 629

ケプラー探査機が発見 104

遠くの星の周りを回る太陽系外惑星が、過去20年間で数百個も見つかった。これらは氷山の一角にすぎない。米航空宇宙局（NASA）のケプラー探査機は北天のごく一部（天球の1%に満たない領域）にある恒星を調べただけで、すでに100個を超える系外惑星を特定したほか、有力な兆候をさらに数千例つかんでいる。天空上の他の星も同様に惑星を従えているはずだ。最近の調査によると、恒星は平均するとそれぞれ1.6個の惑星を持っているとみられる。

どこにでも生えてくる雑草のように、系外惑星は至る所に存在するようだ。生命を宿しているものがあるかどうかはまだわからないが、そうした惑星が発見される可能性は高まっている。

（John Matson／編集部 訳）

原題名 Planets Everywhere (SCIENTIFIC AMERICAN December 2012)

この連載「グラフィック・サイエンス」は随時掲載します。

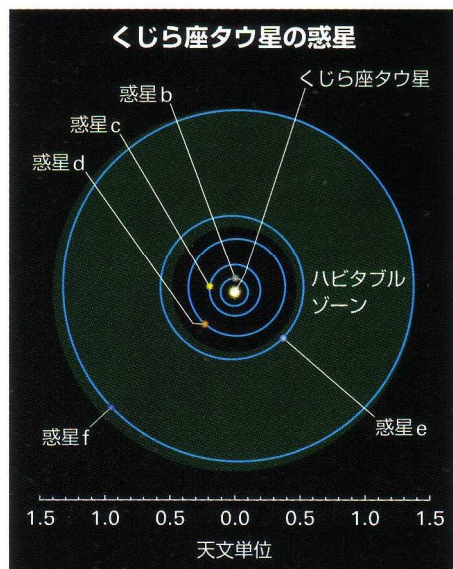
FOCUS

Astronomy

近くの太陽似の恒星に水惑星の可能性

液体の水があるかもしれない惑星が12光年先にみつかった

宇宙のどこかに地球と同じような環境の惑星があれば、その惑星には地球と同じように生命が誕生しているかもしれない。このたび、地球から約12光年の距離にあるくじら座の恒星、タウ星に、地球の2～7倍の質量をもつ5個の惑星がみつかった。タウ星と惑星の距離からすると、2個の惑星には、液体の水があるかもしれないという。生命の存在も期待できるかもしれない。



くじら座タウ星にみつかった、惑星b, c, d, e, fの軌道。惑星eはハビタブルゾーン(液体の水が存在できる範囲)の内縁近くを、惑星fは外縁近くを周回している。天文単位は、太陽と地球の距離を1とする距離の単位。(プエルトリコ大学アレシボ惑星居住可能性研究所の図をもとに作成)

無数にある恒星の中には、地球に似た惑星をもつものもあると考えられている。地球の生命は、水がはぐくんだといわれる。液体の水がある惑星には、地球と同じように生命がいるかもしれない。

恒星のふれから惑星の軌道などを調べた

イギリス、アメリカ、オーストラリアの研究グループは、地球から約12光年の距離にあるくじら座のタウ星に、地球の2～7倍の質量をもつ惑星が5個あることをみつけた。その内の2個の惑星は、水が液体で存在できる距離でタウ星を公転しており、生命が存在する可能性があるという。この成果は、ヨーロッパの科学雑誌『Astronomy & Astrophysics』に掲載されることが決まった。

くじら座タウ星は、地球から19番目に近い距離にある恒星で、質量が太陽の約0.8倍(約 1.56×10^{30} キログラム)、表面温度が太陽の約0.9倍(約5300度)と太陽に似ており、「太陽型星」といわれる。年齢も約58億歳で、約46億歳の太陽に近い。

今回研究グループは、「ドップラー法」を使ってくじら座タウ星を調査した。ドップラー法とは、惑星が周回する影響でおきる恒星のふれを観測して、惑星の最小質量、周期、軌道などを調べる方法だ。

研究グループは、ラ・シヤ天文台(チリ)で観測した約6年間分のデータに、アングロ・オーストラリア天文台(オーストラリア)の約13.5年間分のデータと、ケック望遠鏡(ハワイ)の約9.4年間分のデータを加えて、くじら座タウ星のふれを解析した。

液体の水があるなら生命が存在する?

惑星に液体の水があるかどうかは、恒星からの距離で決まる。惑星が恒星に近すぎて受ける熱が大きいと水は蒸発し、遠すぎて受ける熱が小さいと水は凍結してしまう。

恒星のまわりにある、水が液体で存在できる範囲を「ハビタブルゾーン(生存可能領域)」という。くじら座タウ星では、惑星eとfがハビタブルゾーンを周回していた。2個の惑星は、太陽型星のハビタブルゾーンにみつかった最初の惑星になる。

国立天文台で太陽系外惑星探査プロジェクト室長を務める田村元秀博士は、「くじら座タウ星は太陽に似ており、年齢が太陽よりも年老いています。もし、ほんとうに2個の惑星に液体の水があるならば、生命が存在する可能性は高いと考えられます」と話す。ただし田村博士によると、今回の発見はノイズ(雑音)に埋もれていた惑星の信号をデータ解析によって抽出したもので、解釈をめぐり研究者の間で論争があるという。

惑星の大気を通してくる光を分析する

もし惑星に生命がいたとしても、その姿は地球周辺からは見えない。しかし、惑星の大気に生命活動によってつくられる物質(酸素やメタンなど)が含まれていれば、生命の存在を推測できる。

物質は種類に応じて、特定の波長の光を吸収する。惑星の軌道が地球から見て恒星を横切るときは、惑星の大気を通してくる恒星の光を分析し、大気の成分を調べることができる。

「惑星が恒星を横切らない場合は、惑星表面で反射する光をねらいます。その場合、恒星から直接くる光と、惑星表面で反射してくる光を見分ける必要があります。このような観測は、将来の30m級地上望遠鏡で目指せるでしょう」と田村博士は話す。楽しみにしたい。

(担当:編集部 井手 亮)

協力

田村元秀 国立天文台太陽系外惑星探査プロジェクト室長

補遺了

4. 世界各地の隕石落下の痕跡を求めて

衝突の痕跡

世界各地で小惑星の大気圏突入が目撃されたり、痕跡が発見されたりしている。様々な文献やNASAの資料、日経サイエンスの掲載記事などをもとに興味深い事例をまとめてみた。

チェリャビンスクの隕石落下

2013年2月15日、直径17mの小惑星がシベリア上空で大気圏突入して爆発、破片がチェリャビンスク近郊に落下した。

ボピガイ・クレーター

約3570万年前の新生代古第三紀始新世の末頃に形成された。直径は約100km。衝突した小惑星は直径数km。衝突の際の超高压で、地下の黒鉛層がダイヤモンドに変化した。宝石としての価値はないが、工業用ダイヤモンドとしては世界最大の鉱床とみられる。北米のチェサピーク湾クレーターと、その近くのトムズ・キャニオンクレーターも同時期に形成されたとの説がある。ユネスコのジオパーク（貴重な地質や地形を含む自然公園）に登録されている。

シバ・クレーター

チクシュループ・クレーターができてほどなく再び巨大な小惑星が衝突し、これら2度の衝突で恐竜が絶滅したとの説がある。その説によればインド西方沖の海底にある巨大な凹み状の構造が、そのクレーターとされる。クレーターは直径500km、衝突した天体は直径約40kmと推定されているが、検証はこれから段階だ。

カラ・クレーター

約7000万年前の中生代白亜紀に形成された。現在の地形では直径約65kmだが、当初の直径は推定約120km。

御池山クレーター

2～3万年前、長野県飯田市にある御池山（標高1905m）の南東斜面に小天体が衝突したとみられる。クレーターの直径は推定約900m。

ツングースカ大爆発

1908年6月30日、直径数十mの小惑星とみられる天体が大気圏に突入し、シベリア北部のツングースカ川上空で大爆発、2000km²の範囲の8000万本の木がなぎ倒された。

太古の超巨大衝突の痕跡

南アフリカ北東部のバーバートン地域とオーストラリア南西部のビルバラ地域はかつて1つの陸塊だった。両地域には35億年前～25億年前の間に少なくとも9個の小惑星が衝突した跡が残っている。これらの小惑星は非常に巨大で直径20～50kmだったと推定されている。

南スラウェシ上空での爆発

2009年10月8日午前11時頃（現地時間）。天体の大気圏突入による筋状の雲と大きな爆発音が報告された。

フレデフォート・クレーター

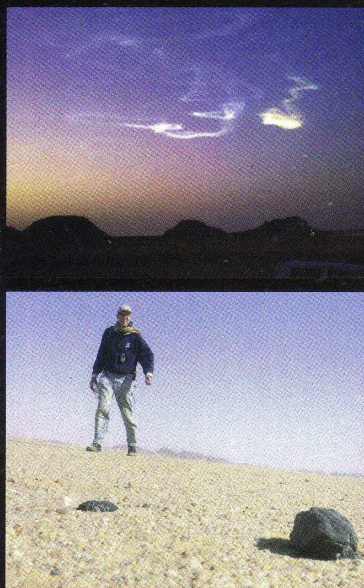
約2億2000万年前に形成された。当初の直径は推定約300km。現存する衝突クレーターでは世界最大。その後の浸食で、現在は約70kmのリング状の構造が残る。衝突によって大規模な地下活動が起こり、世界有数の金鉱床が形成された。世界遺産に登録されている。

ウッドリー・クレーター

約3億6000万年前の古生代デボン紀の末期に形成された。推定直径は60～160km。もし160kmなら世界第4位。

アルマハタ・シッター隕石

2008年10月7日、直径約4mの小惑星2008 TC₃が大気圏に突入し（上段の写真は上空に見られた大気圏突入の痕跡）、アフリカのスーダン北部に隕石が落下した（下の写真）。大気圏突入の前日に小惑星が発見され、突入時刻と地域が予測された初めての事例となった。



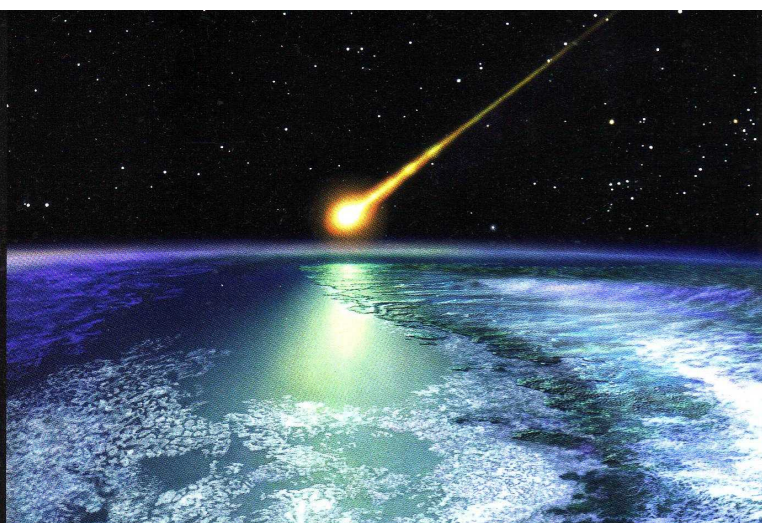
NASA / SETI / P. JENKINS (retro?)
COURTESY MOHAMED ELHASSAN ABDELATIF MAHIR (NOUB NGO), DR. MUAWIA H. SHADDAD (UNIV. KHARTOUM), DR. PETER JENKINS (SETI INSTITUTE/NASA AMES)

2013/2/15 朝方、ロシアの100万都市チェリャビンスク上空の大気圏に直径約20mの小天体が突入、空中で大爆発して約1500人が負傷、約5000棟の窓ガラスが破損しました。日経サイエンスは「特集・隕石の衝撃

／スペースガードの現在」との記事を組んでいます。その中のグラフィックスを紹介します。記事には最近の世界各国でのスペースガードの進展状況を詳しく紹介しています。

サドベリー・クレーター 約18億5000万年前に形成された。当初の直径は推定約250km。現存する衝突クレーターでは世界第2位だが、クレーターとしての地形は失われている。衝突によって大規模な地下活動が起こり、世界最大級のニッケル・銅鉱床が形成された（衝突した小惑星に主に由来するとの説もある）。

ハドソン湾の円弧は？ ハドソン湾の南東部はきれいな円弧を描いているので、巨大な衝突クレーターを連想させるが、これまでの調査の結果、天体衝突をうかがわせる痕跡はなく、地球内部の活動に由来するとみられている。



DOON DIXON

カンギリア隕石 1997年12月9日午前5時頃（現地時間）、グリーンランドの南西部、ケッケアタースワッチアットの入り江で漁をしていた漁船の乗組員がその模様を目撃した。夜明け前で真っ暗だったのに「あたりは真昼のような明るさになった」と述べている。米国の軍事衛星も上空から観測、小惑星が4つ以上に分裂して落ちていく様子を捉えた。大気圏突入の想像図（上）は日経サイエンス1999年2月号「謎の隕石を追う 氷原に消えた大火球」（W. W. ギブズ）による。

マニクアガン・クレーター 約2億1000万年前の中生代三畳紀後期に形成された。直径は約100km。クレーターは多重リング構造で、内側にある直径70kmのリングの凹みは現在、ダム湖になっている。このほか同じ三畳紀後期にセント・マーティン・クレーター（カナダ、直径約40km）とロシュヨール・クレーター（仏、約20km）、オボロン・クレーター（ウクライナ、約20km）、レッド・ウイング・クレーター（米、約9km）も形成された。

チェサピーク湾クレーターとトムズキャニオン・クレーター チェサピーク湾内に埋まっているクレーターは直径85km。その北東約300km、ニュージャージー州東方沖にあるトムズキャニオン・クレーターはそれより小さい。両方ともボビガイ・クレーターと同時期に形成されたと推定されている。

チクシュループ・クレーター 約6550万年前の中生代白亜紀の末期に形成された。当初の直径は推定約180km。現存する衝突クレーターでは世界第3位。現在は堆積層に埋まっており、石油資源探査で発見された。衝突した天体の直径は推定約10km。この衝突による大規模気候変動で恐竜など多くの生物が絶滅した。

カラカス隕石 2007年9月15日、南米ペルー南部チチカカ湖近くのカラカス村付近に落下、深さ約5m、直径13mのクレーターができた。

ワバール・クレーター サウジアラビア南部・ルブアルハリ砂漠の奥地で3つのクレーターが確認されている。最大のは直径約120m。落ちてきた隕石は推定直径約10m。1990年代半ばに現地調査が実施され、衝突時の超高压で砂が圧縮してできたインパクトタイトという岩石や、砂が急に融けて固まったガラス、ニッケルを含む鉄の塊が見つかった。衝突時期は18世紀または19世紀との説がある。クレーターの写真（下）と衝突の想像図（右）は、日経サイエンス1999年2月号「謎の隕石を追う 砂漠が燃えた日」（J. C. ウィンほか）による。



DOON DIXON (Illustration) / JEFFREY C. WYNN (photo)