



シネマ天文楽【10】

砂の惑星

福江 純（大阪教育大学）

1. 異形の惑星と生存環境

ホット・ジュピター、エキセントリック・プラネット、マルチプラネット…。1995年にペガス座51番星で太陽系外の惑星がはじめて確認され、その後、系外惑星の研究が急速に進展した[1][2]。その結果、母星のすぐ近くを公転する灼熱の巨大ガス惑星「ホット・ジュピター」、大きな離心率をもった長円軌道を巡る「エキセントリック・プラネット」、多重惑星系「マルチプラネット」などなど、異形の惑星たちが姿を現し始めた。

まだ観測精度が足らないために、地球型惑星は発見されていないが、地球型惑星の発見も時間の問題だろう。もし地球型惑星が発見されたときにも、太陽系の惑星とは異なった、たとえば、水星軌道よりはるかに内側の母星のすぐそばを巡る“ホット・アース”や、彗星のような長円軌道を巡る“エキセントリック・アース”などが見つかるのだろうか。生命の存在という観点からも、変わった軌道をもつ太陽系外地球型惑星の発見可能性は、非常に関心のあるところだ。

実際、灼熱の“ホット・アース”は無理としても、たとえば、近日点付近では液体の水が存在できるが、遠日点付近では母星からの距離が遠くて氷結してしまうような“エキセントリック・アース”的場合、生命は発生できるのだろうか、発生した生命は進化できるのだろうか、さらには知的生命まで到達できるのだろうか？

このような問題、研究者の中では、おそらく調べた人は一人もいないんじゃあるまいか。研究者も、惑星の軌道は円軌道、という“常

識”に捕らわれているだろうし、ましてや、この宇宙に存在するかどうか確認されていないような現象にはなかなか手が出ないものだ。しかし、エキセントリック・プラネットが発見されたいまこそ、エキセントリック・アースのような、太陽系とは大きく異なった環境下にある地球型惑星の環境を研究し始める好機である。

余談だが、マンガの世界では、このような長円軌道をもった地球型惑星が登場する。アニメにもなった萩尾望都の名作『11人いる！』だ（続編『東の地平、西の永遠』もある）。その惑星では、64年という軌道周期がまた同時に生物の一生のサイクルにもなっているという設定だった。

まあ、“エキセントリック・アース”について議論するのは別の機会に回し（あるのか）、円軌道をもった惑星の環境、とくに生命の居住可能性について、少し考えてみよう。

地球とはまったく異なった環境をもつ地球型惑星は、『スターウォーズ』にもたくさん出てきたし、前回取り上げたソラリスもそうだが、今回取り上げるのはカノープスIIIのアラキスである。

2. 『砂の惑星』

環境生態学的な視点によって大評判になったフランク・ハーバートの大作＜デューン砂の惑星＞シリーズ。その一作目『デューン砂の惑星』を、鬼才デビッド・リンチが映画化したのが、『砂の惑星』（1984年）である（図1、図2）。原作は6作におよぶ超大作で、一作目でさえ、文庫で4分冊にもなる分量だ。それを2時間程度の映画にするのだから、と

んでもないことである。実際、評価はわかれたようで、一部に熱狂的な支持を受けた一方、評論家筋からは酷評されたらしい。興行的にも失敗で、日本でもメジャーになったとは言い難く、知らない人も多いだろう。たぶん(ぼくが最初に見たのが)TVで一度くらい放映されて、今回も資料を探したものの、ビデオは手に入ったが、DVDは見あたらなかった。



図1 『砂の惑星』の1シーン(www.noiseindex.com/jane/faqs/images/dune.jpg)。主人公ポウルと教母モヒアム。

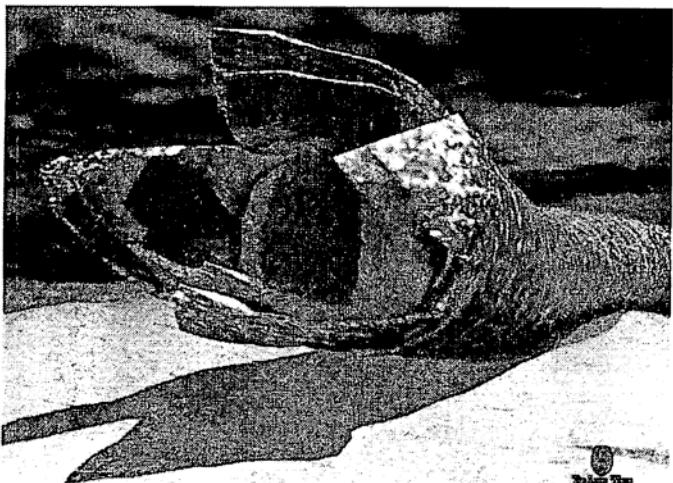


図2 デューンの惑星環境において重要な役割を果たしている砂虫サンドウォーム(wuarchive.wustl.edu/~aminet/pix/trace/dune.jpg)。この“顔”を見てピンと来た人も多いだろうが、名作『風の谷のナウシカ』に出てくる王蟲の元ネタである。

映画のあらすじだが、とりあえず、以前、拙著[1]でまとめたダイジェストを引用させてもらおう。

・・・

時にAD10200年ごろ、人類が銀河帝国を築いた遙かな未来、人類の文明は、銀河皇帝と、惑星領土をもつ大公家、そして星間旅行を独占する宇宙協会の、3勢力の微妙な均衡のもとに維持されていた。

そして、カノープス第3惑星アラキス、砂の惑星デューンとして知られる星。アラキスは、一面乾ききった不毛な惑星だが、その砂丘に棲む砂虫<サンドウォーム>のライフサイクルで生まれるメランジ(香料の一種)は、長寿の薬であり、富の泉だったのだ。

皇帝の奸計と仇敵ハルコンネンの罠の中、皇帝の勅命を受けたアトレイデ公爵がアラキスに乗り込んだところから、長い長い物語が始まる。

ハルコンネンの軍団によって公爵を謀殺され、息子のポウルと妾妃レディ・ジェシカは、アラキスの砂漠へ、砂漠に住む自由民フレーメンのもとへと、逃げのびる。なぜなら、ポウルこそは、空間と時間の間に橋を架けられるもの、蓋然性のある多くの未来をヴィジョンできるもの、<クイサツ・ハデラッハ>だったのである。

時満ちて、ポウルと彼の率いるフレーメン軍団は、皇帝の軍団を破り、さらに人類世界を統合する聖戦を押し進めていく…

・・・

ということで、久しぶりに映画を観てみたが、いやあ、こりや記憶以上にエキセントリックな映画だ。ハルコンネン男爵の狂気が圧倒していて、それが世間受けしなかった理由かも知れない。

なお、余談だが、ハーバートの息子たちの手によって、シリーズの前史にあたる、『公家アトレイデ』『公家ハルコンネン』『公家コリ

ノ』が出版されつつある(『公家コリノ1』まで出ている)。関心のある人は、前史から読み始めて本編に進むと、内容がわかりやすいだろう。とくに誰が書いたとは言わないが、『公家コリノ1』の解説は必読(笑)。

3. ハビタブルゾーン

『砂の惑星』の舞台が、カノープス第3惑星アラキスだ(図3)。砂に覆われた過酷な惑星である。アラキスが砂の惑星になった原因是、砂虫サンドウォームにあるのだが、その点では、生物相と惑星環境の強い相互作用の結果なので、ガイア的な話かも知れない。一方で、水星のような灼熱の惑星や、外惑星のような極寒のガス惑星では、そもそも地球型の生物は生存できない。そういう意味では、大前提として、カノープスIIIは地球型生命が生存できる環境にある惑星だということができるだろう。そこで、地球型生命が存在できる外的環境として、もっとも基本的なものの一つとして、惑星の温度を考えてみる。

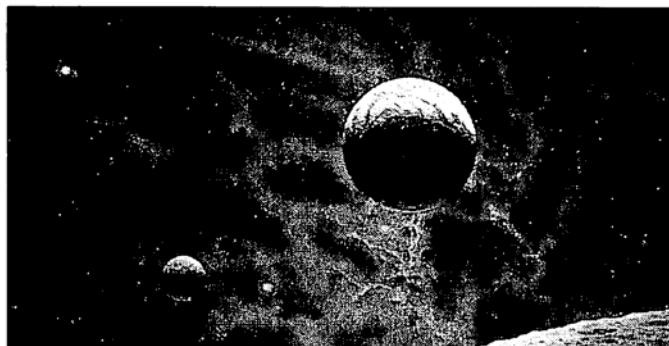


図3 カノープス III アラキス
(www.iaaa.org/exhibit/images/arrakis-dune-be-johnson.jpg)

太陽から可視光などで惑星表面に入射するエネルギーが、惑星表面から赤外線などでもんべんなく放射されると仮定して、惑星のアルベド(反射能)なども考慮し、エネルギー収支の観点から算出する惑星表面の温度が、「放射平衡温度」である。

導出は省略するが、太陽の温度を T_{\odot} 、半径

を R_{\odot} 、太陽から惑星までの距離を r 、そして惑星のアルベドを A とすると、惑星の放射平衡温度 T は、

$$T = T_{\odot} (1 - A)^{1/4} (R_{\odot}/2r)^{1/2}$$

となる。

太陽の表面温度を 5780K、半径を 70 万 km とし、距離 r を天文単位[AU]で測ると、この式は、

$$T = 278 (1 - A)^{1/4} r^{1/2} [K]$$

となる(図4)。

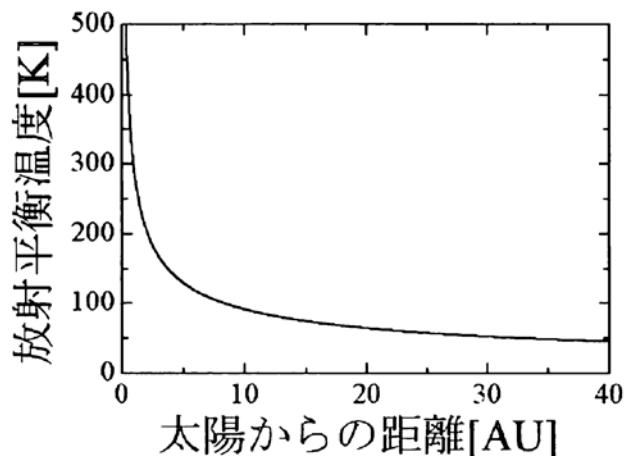


図4 惑星の放射平衡温度。横軸は天文単位[AU]を単位とした太陽からの距離で、縦軸は絶対温度で表した惑星の放射平衡温度。簡単のために、惑星のアルベド(反射能)は0とした。

各惑星の放射平衡温度を表1(アルベド=0)と表2(アルベド考慮)に示す。

表1 惑星の放射平衡温度($A=0$)

惑星	軌道長半径	放射平衡温度
水星	0.3871AU	447K
金星	0.7233	323
地球	1.0000	278
火星	1.5237	225
木星	5.2026	122
土星	9.5549	89.9
天王星	19.2184	63.4
海王星	30.1104	50.7
冥王星	39.5404	44.2

表2 惑星の放射平衡温度

惑星	アルベド	放射平衡温度
水星	0.06	440K
金星	0.78	224
地球	0.30	255
火星	0.16	216
木星	0.73	87.9
土星	0.77	62.3
天王星	0.82	41.3
海王星	0.65	39.0
冥王星	0.54	36.4

もし、アルベドを考えずに地球の放射平衡温度を計算すると 278K (5°C) くらいになるが（表1）、実際には、惑星のアルベドは0ではなく、入射エネルギーの一部は直接宇宙空間に反射されるので、放射平衡温度は小さめになる。たとえば、地球の場合は、アルベドは0.3なので、それを考慮すると、放射平衡温度は、255K (-18°C) くらいになる（表2）。さらに、惑星が大気をもつ場合は、大気の温室効果が温度を上昇させる。地球の場合は、大気の温室効果で温度が上がり、結局、平均気温は 288K (15°C) くらいになっている。したがって、放射平衡温度が惑星の気温そのままになるわけではないが、惑星の温度環境を表す目安にはなる[3][4]。

実際の惑星の温度は、惑星のアルベドや大気の有無にも左右されるが、以下では、簡単のために、アルベドも温室効果も考えないことにしよう。すなわち単純なエネルギー収支だけから惑星の放射平衡温度を見積もる。そのとき、放射平衡温度が 273K 以下（零下）になれば、そのような惑星上では水は凍り付くだろう。逆に、放射平衡温度が 373K 以上（沸点）になれば、そのような惑星上では水は沸騰してしまう。おおざっぱにいって、放射平

衡温度が 273K (0°C) から 373K (100°C) の間でのみ、惑星上で液体の水が存在できることになる。

生命活動の維持にとって、液体の水の存在は不可欠であるという考え方からすると、惑星上で液体の水が存在できる範囲でのみ生命も存在できる、そのような惑星でのみ生命も居住できると考えられるわけだ。そこで、母星のまわりの惑星軌道のうち、惑星の放射平衡温度が 273K (0°C) から 373K (100°C) の間になる領域を、「ハビタブルゾーン（居住可能領域）」と呼ぶのである。

太陽系の場合は、ハビタブルゾーンは、0.6 天文单位から 1.12 天文单位の間である（図5）。

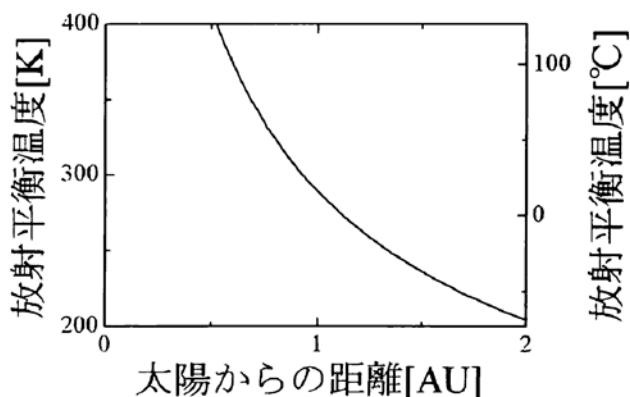


図5 太陽系のハビタブルゾーン。放射平衡温度が摂氏（右側の縦軸）で 0°C から 100°C の範囲に収まる領域。

最初にも触れたように、ハビタブルゾーンの概念をさらに発展させ、たとえば、エキセントリック・アースのハビタブルゾーンを求めてみるのも面白いだろう。熱容量が小さな（したがって熱しやすく冷めやすい）岩石できた岩石惑星の場合は、大気や海洋の効果を無視できるので、比較的簡単だろう。しかし、地球のように海洋で覆われた水惑星の場合は、海洋が熱を溜めて応答が遅れるので（その結果、地球の場合は、もっとも暑い時期が夏至より 2 ヶ月ぐらい遅くなる）、その分、複雑になるだろう。さらに、大気があり雲が生

じる環境にあると、高温環境では雲が発生してアルベドが変わるので、さらに複雑になる（低温環境でも氷結してアルベドが変わる）。大気の温室効果も重要になる。海洋による緩和作用やアルベドの効果を取り入れると、なかなか難しそうだ。

4. 銀河系のハビタブルゾーン

でも、世の中には、いろいろ面白いことを考える人がいるもので、銀河系におけるハビタブルゾーン(Galactic Habitable Zone; GHZ)を調べた人もいる[5][6]。通常のハビタブルゾーンは、恒星周辺で生命活動が維持できる条件を満たす空間領域を意味する。それに対して銀河ハビタブルゾーン GHZ とは、銀河系の中で居住可能惑星をもつ恒星系が存在する時間的・空間的領域のことだ。すなわち、以下わかるように、進化の時間というパラメータも入ってくるのである。GHZ について最初に提案したのは前者の論文[5]のようだが、ここでは Astro-PH から拾った後者の論文[6]にしたがって、その紹介をしてみよう。

銀河系内のある場所（銀河系中心から距離 r ）である時期（現在から遡る時間）に存在する恒星系が、生命の生存に適した居住可能惑星をもつかどうかは、もちろん、その星が惑星系をもち、かつその惑星のいくつかがその星のハビタブルゾーンにあることは当然として、その恒星系を取り囲む銀河環境にも左右されるだろう。具体的には、(1)重元素量の多寡、(2)超新星の頻度、(3)生物進化が起こるための時間などだ。

まず(1)重元素量の多寡とは以下のようのことだ。地球型の惑星を形成するためには、恒星が生まれるガス雲に重元素（天文学では水素とヘリウム以外の元素を指す）が含まれていることが必要だ。重元素が足らなければ地球型惑星は形成されない。しかし逆に、重元素が多くても、巨大ガス惑星が大きくな

りすぎて地球型惑星の形成を妨げるらしい。そこで適切な重元素量の範囲が存在することになる。重元素量は、銀河系の中の場所（半径）によっても、銀河系の進化の時期によつても異なるが、銀河モデルからはある程度推定できるので、適切な重元素の領域が算出できる。

つきの(2)超新星の頻度というのは、以下のようなことだ。星の進化の末に生じる超新星爆発は、衝撃波や宇宙線・ガンマ線・X 線の放射など、周囲の宇宙空間に破壊的な作用をもたらす。近傍で超新星爆発が起これば、惑星上の生命は絶滅してしまうだろう。したがって、生命が仮に発生したとして、今まで生き残っているためには、40 億年くらいの間は近傍で超新星爆発が起こっていないことが望ましい。超新星爆発の頻度などに仮定を置いて、この条件を算出することができる。

さらに(3)の進化時間というのは、地球を例に取ると、複雑な生命が進化するためには、40 億年 (± 10 億年) ぐらいの時間がかかるという条件だ。

銀河系内で誕生する星の割合に、以上の 3 つの条件を勘案していくと、居住可能恒星系の存在する時間・空間領域が導かれるのだ。具体的な計算結果を図 6 に示す。

図 6 は時空ダイアグラムなので少しわかりにくいが、横軸が kpc で表した銀河系中心からの距離で、縦軸は上（現在）から下（銀河系の形成）に向けて 10 億年単位で表した現在からの時間である。各領域の説明をするが、原図はカラーで白黒にするとコントラストが同じくらいで見分けにくいが、埋め込んである文字をもとに判断して欲しい（といつても、文字もつぶれているかも）。

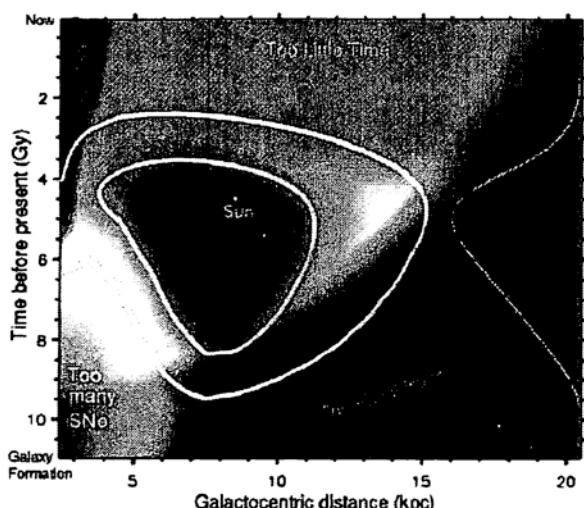


図6 銀河系時空における銀河系ハビタブルゾーン GHZ。横軸は kpc で表した銀河系中心からの距離で、縦軸は 10 億年単位で表した現在（上）から過去（下）に測った時間。この時空図で、白い実線の範囲内が、今日でも複雑な生命を宿す惑星をもつ恒星系が存在すると考えられる領域。内側の白い実線は確率 68% 以上、外側は 95% 以上。

右下 (Too Metal Poor) と左上 (Too Metal Rich) の領域（原図では青）が、(1)の重元素の多寡によって除外される領域だ。右下 (Too Metal Poor) は重元素が少なすぎて地球型惑星が形成されない領域で、銀河系が誕生した頃は空間的にもかなり広い範囲にわたっていたが、銀河系が進化して全域が重元素によって汚染されるに従い、だんだんと外縁部に押しやられていく。一方、左上 (Too Metal Rich) は重元素が多くて地球型惑星の形成が阻害される領域で、銀河系中心部からはじめり、銀河系の進化と共に少しずつ拡がっている。

つぎに左下 (Too many SNe) の領域（原図では赤）は、(2)の超新星の頻度が多くて生命が絶滅してしまう領域だ。星の密度の高い銀河系中心部で昔の時期（すなわち現在までの時間が長くて超新星が生じる確率が高い）にこのような領域が現れる。

そして中央上部 (Too Little Time) が、(3)の進化時間にかかわる領域で、生命が発生し

たとしても現在までの時間が短すぎて、現時点では複雑な生命まで進化できていない領域だ。

結局、この時空図では、中央やや左よりの時空領域（原図では緑）が、銀河系時空におけるハビタブルゾーン GHZ となる。太陽 (Sun) はもちろんこの領域に入っている。なお白い実線のうち、内側の実線は、今日でも複雑な生命を宿す惑星系をもつ恒星が存在する確率が 68% 以上の領域を示し、外側の実線は 95% 以上の領域を示す。

最初にも述べたとおり、現在、つきつきと系外惑星が発見されつつあり、地球型惑星が発見されるのも時間の問題だと思われる。惑星の居住環境やハビタブルゾーンの研究は今後もますます重要になるだろうし、さらには銀河環境・銀河ハビタブルゾーンの研究も進むだろう。

さて、新しい現象が初めて発見されて、いきなりその分野の研究が進むわけではない。最初は少数の研究者がおそるおそる手を出し、次第に研究者の数が増えて、その分野の研究が花盛りになるまでには、10 年ぐらいのタイムラグがあるようだ。

たとえば、ぼくが関係しているブラックホール周辺の活動現象の場合、ブラックホールはくちょう座 X-1 が最初に発見されたのは 1970 年ぐらいだが、ぼくが大学院に入った 1970 年代後半でさえ、“ブラックホールなんかほんまにあるんかいな”と言われたぐらいだ。ブラックホール研究が本当に盛んになったのは 1980 年代以降である。

あるいは、ガンマ線バーストと呼ばれる現象の場合、軍事衛星による“発見”は別として、詳しく調べられたのは、ガンマ線観測衛星コンプトンが軌道投入された 1991 年以降だ。そして現在、ガンマ線バーストの研究は花盛りである。

そして、太陽系外惑星の場合。1995年に発見されてほぼ10年。いままさに花盛りになろうとしている。5分から7分咲きぐらいの感がある。おそらく予想外のことが、観測的にも理論的にも、これからも発見・研究されていくに違いない。いまさら研究の主分野を変えるつもりはないが、ちょっと手ぐらい出してみたい気もするこのごろだ。

参考文献

- [1]福江 純『SF 天文学入門（下）』裳華房（1997年）
- [2]栗野諭美、福江 純共編『最新 宇宙学』裳華房（2004年）
- [3]小倉義光『一般気象学』東京大学出版会（1984年）
- [4]ホートン『大気物理学』みすず書房（1981年）
- [5] G. Gonzalez, D. Brownlee, P. Ward, 2001, Icarus, 152, 185
- [6] C. H. Lineweaver, Y. Fenner, B. K. Gibson, 2004, Science, Jan 2.