

# ハビタブルゾーン

初等教育教員養成課程理科選修 金光研究室 190433 堀田卓志

## 1. 序論

地球外生命体はいるのか。この疑問は誰しもが1度は考えたことがあるであろう。近年、宇宙科学技術はめまぐるしい速さで進歩している。観測技術の発達から、2005年にアメリカの探査チームが地球から15光年離れた赤色矮星グリーゼ876において、地球質量6~7倍の地球型惑星とみられるグリーゼ876dを発見した。続く2007年には、地球から20光年離れた赤色矮星グリーゼ581に地球質量の8倍(グリーゼ581d)の惑星が発見される。このグリーゼ581dはハビタブルゾーン内を公転している可能性が示唆されている。また2009年には地球質量の2倍とみられるグリーゼ581eが見つかっている。これらは「スーパーアース(巨大地球型惑星)」と呼ばれ、太陽系の地球型惑星と比較するとやや質量は大きい。しかし主成分は地球などと同様、岩石(一部は氷)とされており、今後、更なる低質量の惑星発見が期待されている。また、ヨーロッパ南天天文台(ESO)が原始惑星系円盤の内側領域で、地球型惑星の材料となる岩石質微惑星の形成が進んでいるという観測結果を報告したことや、シミュレーション(数値計算実験)技術の発達から、多くの恒星に地球型惑星が存在する可能性があるという考え方が強くなってきている。

本研究では、地球外生命体が誕生・または存在する可能性のある環境についての基本的な理論に基づき、Visual Basic 6.0を用いてハビタブルゾーンに関するモデルをシミュレーションにより視覚化し考察する。

## 2. ハビタブルゾーン

ハビタブルゾーン(HZ: habitable zone)とは、宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる天文学上の領域であり、惑星の表面温度が、生命が潜在的に生き延びるために必要な液体の水を維持できるかもしれない程度となる、恒星の周りの球状の宇宙空間の領域である。そもそもはオットー・シュトルーベが考えた概念であるとされる。諸説あるが、太陽系では大体0.7~1.4AUの領域がHZだといわれている。(1AU=1億4950万km=現在の太陽と地球の距離)

## 3. 太陽定数

太陽定数とは、地球の大気圏外で太陽に正対する単位面積が単位時間に受ける太陽の輻射総量のこと、太陽の11年の周期活動に伴って0.1%程度変動し、その値は約 $1.38 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ (= $1.96 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-2}$ )である。この値は、シュテファン=ボルツマンの法則を用いて計算することができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_+ : \text{地球-太陽間の平均距離 (1天文単位) を半径とする球の表面積} \\ S : \text{太陽の表面積} \\ T : \text{太陽の温度} \doteq 5800\text{K} \\ \sigma : \text{シュテファン・ボルツマン定数} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \\ R_+ : \text{太陽の半径} \doteq 6.96 \times 10^8 \text{ m} \\ R : \text{太陽-地球間の距離} = 1 \text{ AU} = 1 \text{ 億 } 4950 \text{ 万 km} \end{array} \right.$$

このように設定すると、太陽定数は次のような計算できる。

シュテファン=ボルツマンの法則により、

$$\text{太陽の単位面積から出るエネルギー } I = \sigma T^4$$

$$\text{太陽から出るエネルギー } L_0 = S \times I = 4\pi R_+ \times \sigma T^4 \doteq 3.90 \times 10^{26} \text{W}$$

$$\text{よって、太陽定数 } F = \frac{L_0}{S_+} = \frac{4\pi R_+^2 \times \sigma T^4}{4\pi R^2} = \frac{3.90 \times 10^{26} \text{W}}{2.82 \times 10^{23} \text{m}^2} \doteq 1.38 \times 10^3 \text{W/m}^2$$

#### 4. 放射平衡温度

放射平衡とは、時間的にはほぼ一定の比率で推移する状態のことをいう。地球大気と固体地球を一緒に考えたものを「地球」と表現すると、地球に入射してきた太陽放射の一部は大気中の気体分子や雲によって散乱・反射され、また地表面に達した太陽放射の一部もそこで反射され宇宙空間に戻る。このように定義した地球で反射された放射量と入射太陽放射量の比を地球のアルベドという。地球は残りを吸収して暖められているわけであるが、一方で地球自身も絶えず放射をして熱を失っている。この両者が釣り合って地球の温度が変化しない状態にあることを放射平衡の状態にあるといい、そのときの温度を放射平衡温度という。つまり、入射エネルギー=放射エネルギーの式が成り立つ。

#### 5. シミュレーション

今回のシミュレーションでは、放射平衡温度  $T_+$  に範囲を設け（特に、太陽系のハビタブルゾーンの場合は、温度を  $273\text{K} \leq T_+ \leq 373\text{K}$  にする）、太陽の半径  $R_+$ 、反射率（アルベド）  $a$ 、太陽の温度  $T$  を加えた4つの数値を定めることで、その条件を満たすゾーンを表示できるようにした。その原理は以下のとおりである。

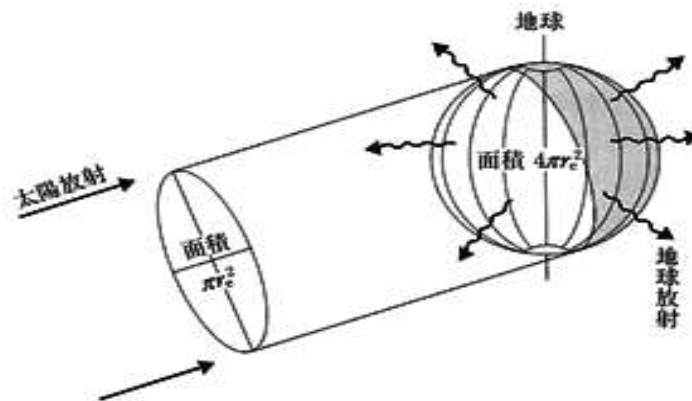


図1

図1を見ると分かるように、入射エネルギーは太陽エネルギーを地球の断面積で受けるので、式としては  $F(1-a) \times \pi r^2$  となる。放射エネルギーは、地球の表面積から絶えず放射されているので、式としては  $4\pi r^2 \times \sigma T_+^4$  となる。

放射平衡  $\Rightarrow$  入射エネルギー=放射エネルギー

$$F(1-a) \times \pi r^2 = 4\pi r^2 \times \sigma T_+^4$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a : \text{反射率 (アルベド)} \doteq 0.3 \\ r : \text{地球半径} \doteq 6400\text{km} = 6.4 \times 10^6\text{m} \\ T_+ : \text{放射平衡温度 \{地球の表面温度: K (ケルビン)\}} \end{array} \right.$$

これを  $F$  について解くと、

$$F = \frac{4 \sigma T_+^4}{(1-a)} \dots \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $F$  は太陽定数であるので、 $F = \frac{4\pi R_+^2 \times \sigma T^4}{4\pi R^2}$  である。

これを①に代入すると、

$$\frac{4\pi R_+^2 \times \sigma T^4}{4\pi R^2} = \frac{4 \sigma T_+^4}{(1-a)}$$

$R^2$  について解くと、

$$R^2 = \frac{R_+^2 (1-a)}{4} \left( \frac{T}{T_+} \right)^4 \dots \dots \textcircled{2} \text{ の式が得られる。}$$

$R$  : 太陽 - 地球間の距離     $R_+$  : 太陽の半径     $a$  : 反射率 (アルベド)  
 $T$  : 太陽の温度     $T_+$  : 放射平衡温度 (地球の表面温度)

この②の式から分かるように、太陽 - 地球間の距離  $R$  は、それぞれ、太陽の半径  $R_+$ 、反射率 (アルベド)  $a$ 、太陽の温度  $T$ 、放射平衡温度 (地球の表面温度)  $T_+$  を定めることで求めることができる。

## 6. 結果

シミュレーションの実行結果の一部を以下に示す。下の表は、シミュレーションを行う上で決定した各入力値の値である。

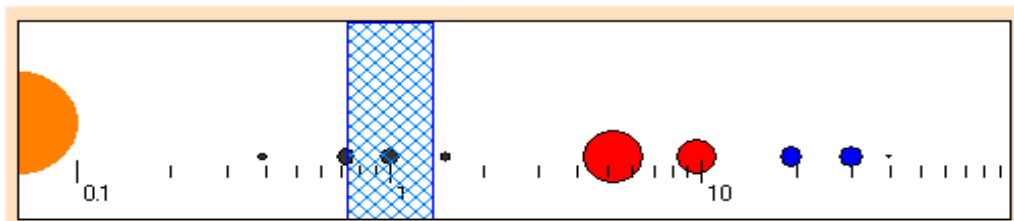
・太陽系のハビタブルゾーンの条件

	太陽の半径	反射率 (アルベド)	太陽の温度	放射平衡温度 (地球の表面温度)
図 2	$6.96 \times 10^8 \text{m}$	0.3	5800K	$273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$

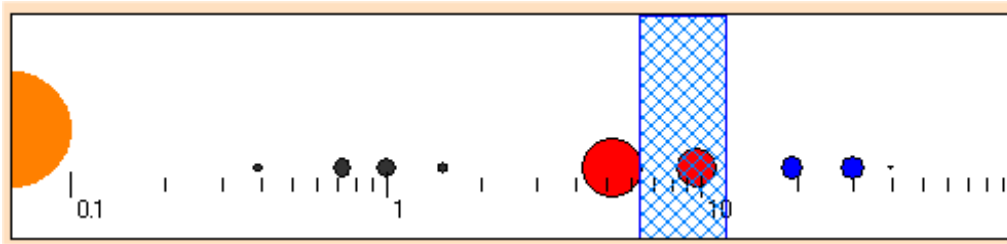
・シミュレーションで設定した各条件

	中心星の半径	反射率 (アルベド)	中心星の温度	放射平衡温度 (地球の表面温度)
図 3	$1.4 \times 10^9 \text{m}$	0.3	12000K	$273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$
図 4	$5.0 \times 10^8 \text{m}$	0.3	4000K	$273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$
図 5	$6.96 \times 10^8 \text{m}$	0.7	5800K	$273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$
図 6	$6.96 \times 10^8 \text{m}$	0.3	5800K	$173\text{K} \leq T \leq 273\text{K}$

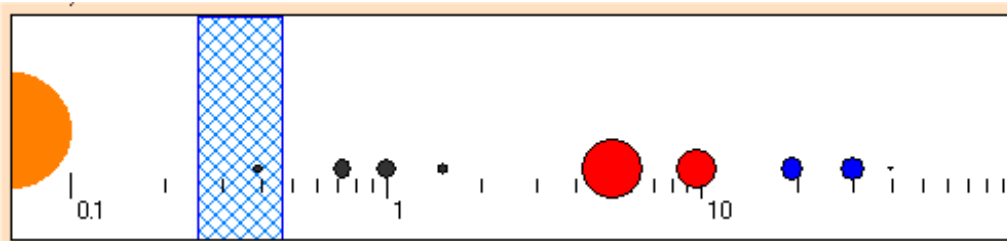
・図 2 (太陽系のハビタブルゾーン)



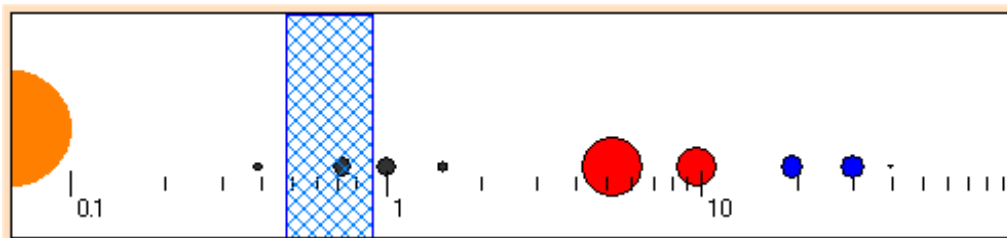
- ・ 図 3 (太陽の半径と太陽の温度を太陽より大きくした場合)



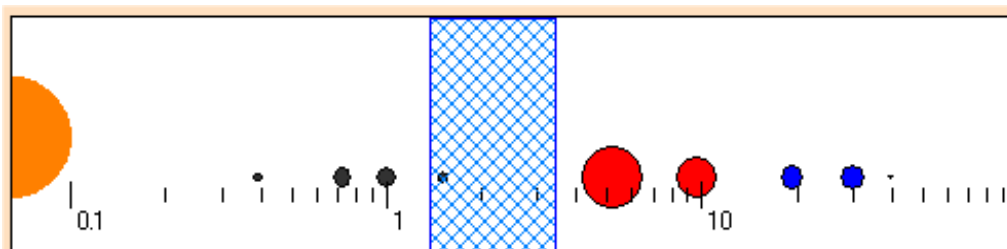
- ・ 図 4 (太陽の半径と太陽の温度を太陽より小さくした場合)



- ・ 図 5 (反射率 (アルベド) を大きくした場合)



- ・ 図 6 (放射平衡温度を 0℃以下にした場合)



## 7. 考察

今回は、Visual Basic 6.0 を用いて、ハビタブルゾーンに関するシミュレーションを行った。太陽定数と放射平衡温度の関係から、太陽半径、反射率、太陽温度、平衡温度の4つの値を定めることでハビタブルゾーンを表示することができるようになった。さらに、この値を様々に変えることで、あらゆる条件を設定することができ、それを満たすゾーン (範囲) も表示することができた。

今後の課題としては、今回は液体の水を保持できるのかという第一近似的なものでシミュレーションを行っているため、地球の温室効果や大気成分など、もっと細かな条件を加味した上でハビタブルゾーンを表示できるようなプログラムの作成、改良が必要であると思われる。また、生命の潜在的に生存するための条件についても、さらに詳しく検証していきたい。