

# 恒星・惑星の条件からハビタブルゾーンの存在を探る

葛西 義之介 (高2) 【東京学芸大学附属高等学校】

## 要旨

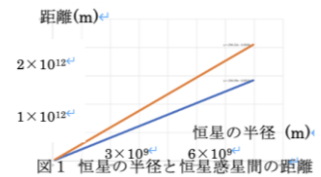
本研究の目的は、生命の存在可能性とも関わりのある「ハビタブルゾーン (以下HZ)」がどのような場所に、どのような条件ならば存在するのかを明らかにすることである。物理的な計算をすることで具体的に計算式の精度を確かめながら一般へと応用し、結果として木星よりも外側を公転する惑星はHZに入ることがあり得ないといった結果を得た。

### 1. はじめに

「宇宙に地球外生命が存在するのか」という問いに人類は昔から大きな興味を抱いていた。この議論で助けとなるのが、1953年に提唱されてから研究が進んできたHZである。HZとは、ある惑星系においてその場所に惑星があれば液体の水が存在すると考えられる範囲のことで、James F. Kastingら(1993)は、HZの範囲を内側は暴走温室状態にならないことから、外側は全球凍結にならないことから、0.95auから1.37auであると定義した。このように、具体的な条件におけるHZの測定は行われているがHZの一般化はあまり行われていない。そこで本研究ではHZができる条件をいくつかの側面に絞って検討し、どんな条件でHZができ、どのようにすればでき得ないのかを探究することを目的とした。

### 2. 方法

太陽系を例にしてHZの外側と内側における太陽定数(以下C) ( $1\text{m}^2$ あたりの恒星から受け取るエネルギー量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )) を計算し、これをもとに様々な条件下でのHZの範囲を求めた。次に、遠心力、万有引力の式から惑星が存在する位置を求め、先ほど求めたHZの範囲と連立し、どんな条件ならばどこにHZができるのかを探究、考察した。



### 3. 結果

0.95au, 1.37au地点でのCを求めた。最大C (0.95au)  $1527.71 (\text{W}/\text{m}^2)$  最小C (1.37au)  $734.59 (\text{W}/\text{m}^2)$  この数値を用いて恒星の半径を変えた場合のHZの変化を計算したところ図1のように図中の二つの直線で囲われた領域としてHZを表せた。

次に惑星の存在できる位置を一般化するため次のように式を立てた。

① 万有引力( $F = G \frac{Mm}{r^2}$ )と遠心力( $F = mr\omega^2$ )が釣り合う  $\rightarrow r^3 = \frac{GM}{\omega^2} \dots \textcircled{1}$

② 主系列星の質量が密度に反比例  $\rightarrow M = r_f \times \sqrt[3]{\frac{4}{3}\pi\rho} \dots \textcircled{2}$  ( $r_f =$  恒星の半径 (m))

③ ①式に②式を代入し、定数をまとめた  $\rightarrow r = \frac{r_f^3 \times 5760}{\omega^3} \dots \textcircled{3}$ 。この式から計算し、先

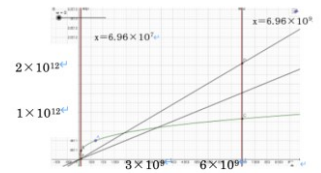


図2 図1に惑星の存在する位置を重ねた図

ほどのグラフを重ねた結果図2を描くことができた。

### 4. 考察① 太陽系の数値を用いた事例

①式は恒星の半径 $r_f$ と惑星の公転角速度 $\omega$ の二つが変数である。まずは角速度を実際の惑星に当てはめて考える。地球...HZ内に惑星が存在できるためには $44\text{万km} < r_f < 75\text{万km}$ で、実際の太陽半径 $r_0 69\text{万km}$ を含む。→HZ内にある。火星... $82\text{万km} < r_f < 141\text{万km}$ で、 $r_0$ を含まない。→HZにない。金星... $27\text{万km} < r_f < 46\text{万km}$ で、 $r_0$ を含まない。→HZにない。

### 5. 考察② 一般的な系外惑星で考えた場合

式からわかるように恒星の半径 $r_f$ を固定して角速度 $\omega$ だけを大きくすると距離 $r$ は小さくなり、角速度 $\omega$ だけを小さくすると距離 $r$ は大きくなる。つまり、角速度を大きく(あるいは小さく)すれば絶対にHZを持ちえない角速度を求めることができる。これを計算したところ次のようになった。

$\omega$ の最小値の場合  $1.24 \times 10^{-8} (\text{s}^{-2}) \dots \textcircled{2}$   $\omega$ の最大値の場合  $2.15 \times 10^{-6} (\text{s}^{-2}) \dots \textcircled{3}$

角速度が②の時公転周期は約16年、角速度が③の時公転周期は約34日になる。②に近い惑星には木星(約12年)と土星(約30年)がある。すなわち、太陽系でいうと木星よりも外側にあるような惑星はどんなに中心星が膨張(収縮)しても恒星が主系列星である限りHZには入り得ないのである。同様に③近い惑星には水星(88日)がある。すなわち、太陽系でいうと水星よりも太陽の近くを回るような惑星も同様にHZには入り得ないとわかる。

### 6. 考察③ 計算の妥当性の調査

実際にHZの推定がなされている系外の惑星系であるTrappist-1のデータを用いて今回の探究の妥当性を調べた。(Trappist-1とは地球から水瓶座の方向にある太陽の1/10ほどの恒星であり、周囲にbからhまで7つの岩石惑星が見つかっている。中でもe,f,gの三つはHZ内にあるとされている。)すると、7つの惑星のうちd,eの二つの惑星がHZ内にあるとわかった。実際の結果とは差が出てしまったが、これはTrappist-1の半径が今回の「主系列星」の定義の端であること、惑星系のサイズが小さすぎて誤差が非常に大きく出てしまうことが要因として挙げられる。

### 7. まとめ

このように、その惑星がHZに入りうるかどうかはその惑星の公転周期が分かれば計算することができた。また、5での計算によると私たちがハビタブル惑星を探りたい時には木星よりも公転周期が長い惑星について考える必要はないのである。もちろん今回の計算はかなりシンプルなものであるし、恒星の半径と表面温度の関係なども取り入れられていないが、今後の研究ではこのようなことも考えていきたい。

### 8. 引用文献

James F.Kasting, Daniel P.Whitmire, Ray T.Reynolds. (1993). Habitable Zones around Main Sequence Stars.

Icarus. 101. 101-128

Nasa "Largest Batch of Earth-size Habitable Zone Planets Found Orbiting TRAPPIST-1".

<https://exoplanets.nasa.gov/trappist1/> 2023/01/24