

# ハビタブル惑星の気候

小玉 貴 則

〈東京大学総合文化研究科先進科学研究機構 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: koda@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



近年、観測精度の向上により、惑星表面に液体の水を保持することが可能な惑星（ハビタブル惑星）の候補が検出され始めてきた。ハビタブル惑星は、従来、鉛直1次元放射対流平衡モデルを用いてハビタブルゾーンを検討することで行われてきた。近年の研究により、3次元大気大循環モデルを用いたハビタブル惑星の気候検討が始まり、水を保持する惑星気候の多様性が明らかになってきた。本稿では、系外惑星科学における地球型惑星気候を紹介し、具体的なハビタブル系外惑星候補を挙げ、それらのハビタビリティを検討する。

## 1. ハビタブル惑星

『この宇宙に地球のような生命を宿す惑星はあるのか?』この疑問は、幼い頃一度は考えた、天文学において重要な問題の1つであるだろう。観測技術の目覚ましい発展と進歩により、今や、多くの太陽系外惑星（以下、系外惑星）が検出されている。その中には、惑星の半径と質量の関係から、地球型惑星であると考えられる天体も存在しており、地球に類似した惑星の探索が精力的に行われている。一言で『地球に類似した惑星』と言っても捉え方は様々である。例えば、地球の大気は主に78%の窒素、21%の酸素、そして、微量の二酸化炭素（400 ppm）で構成され、その大気圧は1気圧であり、海洋を保持し、プレートテクトニクスが機能しているなど、多くの側面を持っている。生命となるとより複雑になる。当然ではあるが、地球型惑星の発見自体が生命の発見に直接的に繋がるわけではないため、現段階では、生命の存在に必要な条件を整理し、検討することが必要であるだろう。生命の存在条件を考える上で、地球上に存在する生命を仮定すると、多くの生命の生存活動の中で液体の水をどこかで必

要とすることから、液体の水が生命の存在には必要不可欠であると考えられる。よって、惑星科学におけるハビタブル惑星の条件とは、液体の水を惑星表面に維持することができる惑星と定義することができる。本稿では、“ハビタブル惑星”の現状の理解をレビューし、それを通して、曖昧になりがちな“ハビタブル”という言葉を明確にしたい。

## 2. ハビタブルゾーン

惑星表面に液体の水を維持することのできるハビタブル惑星について議論する際に、最もよく用いられている概念が『ハビタブルゾーン』である[1, 2]。ハビタブルゾーンは、惑星表面に液体の水を維持することができる、中心星からの距離の範囲で定義されている。惑星が中心星から近い軌道を持つ場合、強い中心星放射により惑星表面の水が全て蒸発してしまい、反対に中心星から離れた軌道の場合、中心星放射は弱いため、惑星表面は凍結してしまうだろう。多くのハビタブル惑星に関する研究は、ハビタブルゾーンの境界の検討に焦点を当て、惑星表面に液体の水が維持できる中心星放射の範囲を定量的に検討してきた

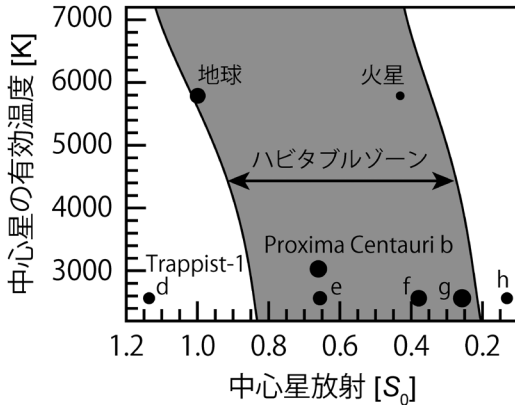


図1 鉛直1次元放射対流平衡モデルで見積もられたハビタブルゾーン [2]。 $S_0$ は現在地球が受け取っている太陽放射フラックス。

(図1)．ハビタブル惑星の条件を検討する前に、生存可能条件と連続的生存可能条件を整理する。生存可能条件とは、ある一瞬、惑星表面に液体の水が存在できる条件であり、一方で、連続的生存可能条件とは、(生命が進化できるような)長期間、生存可能条件が維持される条件である。

## 2.1 ハビタブルゾーン内側境界

ハビタブルゾーンの内側境界は、“瞬間的な”内側境界である『暴走温室効果の発生』と“長期的な”内側境界である『湿潤温室効果の発生』の2つの境界が提案されている。

### 2.1.1 暴走温室効果

水蒸気は強い温室効果気体であり、惑星表面温度が高いほど大気中の水蒸気は多くなる。よって、これは正のフィードバック機構であり、ある条件で温室効果が暴走し、惑星表面に液体の水が存在できなくなる場合がある。この状態を暴走温室状態と呼ぶ。惑星表面温度が上昇した場合、それに伴い惑星放射も増大する。しかし、惑星表面がある程度高温になると、惑星大気中に多くの水蒸気が含まれ、大気構造が水蒸気の飽和蒸気圧曲線に漸近する。水蒸気に支配された大気構造の場合、表面温度によらず、光学的厚さが1付近の温度が一定となる。すなわち、湿潤な大気から射出

できる惑星放射には上限値が存在している [3]。この上限値を射出限界と呼ぶ。

現在の地球の大気は湿潤であるが、太陽から受け取った太陽放射と射出する惑星放射が釣り合っている。しかしながら、地球のように湿潤な大気を持つ惑星が射出限界より大きな中心星放射を受け取った場合、惑星は射出限界以上のエネルギーを宇宙に捨てることができないため、余った熱は惑星表面の水の蒸発に使われる。これは水が全て蒸発するまで継続する。したがって、ハビタブルゾーンの内側境界の1つである暴走温室効果の発生は、惑星が受け取る中心星からのエネルギーと射出するエネルギーのバランスにより決まっている。

### 2.1.2 湿潤温室効果

現在の地球の大気構造では、地表面で蒸発した水蒸気は、対流により対流圏界面に到達するまでに凝結するため、大気上層への水蒸気の輸送は制限されている。この機構をコールドトラップと呼ぶ。中心星放射が増大した場合、惑星表面温度が上昇し、対流圏界面の位置も上昇する。飽和水蒸気分圧が大きくなった場合、大気上層に運ばれる水蒸気量が大きくなる。大気上層に運ばれた水蒸気は光解離し、その結果として生じる水素が中心星からの極紫外線により加熱され、宇宙空間に散逸する。大気上層の水蒸気混合比が $10^{-3}$ の場合、45億年間で地球海洋の水量が散逸することになる。大気上層でこの水蒸気混合率が達成された状態を湿潤温室状態と呼び、連続的生存可能条件を規定している [1, 2]。

以上により、提案されているハビタブルゾーン内側境界は2つある：暴走温室状態の発生と湿潤温室効果の発生である。湿潤温室効果の発生における大気上層の急激な水蒸気混合比の増大は、惑星大気の射出限界に近い強度の中心星放射で起こる。Kopparapu et al. (2013) [2] の1次元放射対流平衡モデルに基づく、湿潤温室効果の発生は $1.015 S_0$ となり、暴走温室効果の発生は $1.06 S_0$ と

なる。ここで、 $S_0$ は現在地球が受け取る太陽放射である。中心星の光度は、惑星の大気構造を決める重要な外力である。太陽型の中心星の場合、中心星の光度は時間とともに増大することが知られている。よって、中心星の光度進化を考慮すると、湿潤な大気の進化は、恒星の光度増大に伴い、湿潤温室状態になり、その後、暴走温室状態に陥ることになる。ここまでに議論したハビタブルゾーン内側境界は、1次元放射対流平衡モデルに基づいた検討である。常に湿潤な惑星表面を仮定し、大気が十分に湿潤であることを想定している。それは、暗に、太陽-地球の仮定に基づいてハビタブルゾーン内側境界の定義を規定していることになっている。中心星が太陽型星と異なり、かつ、質量、半径、大気組成・量も地球と異なる系外地球型惑星におけるハビタビリティをハビタブルゾーンに基づいて検討することには注意が必要である。

## 2.2 ハビタブルゾーン外側境界

ハビタブルゾーンの外側境界の定義は、惑星が全球凍結状態に陥る中心星からの距離である。全球凍結状態とは、全球の表面温度が273 K以下になり、全惑星表面が凍結している状態である。現在の地球は極域に氷床が存在しているので、部分凍結状態であり、全く氷床がない場合は無凍結状態と呼ばれている。地表面温度に対するアルベドの変化（氷のあり／なし）を考慮し、南北1次元エネルギーバランスモデルを用いると、これら3つの状態は多重解であることが知られている[4]。中心星放射または二酸化炭素濃度を減らしていく場合、惑星表面温度が低下し、その結果として惑星表面は雪で覆われる。雪で覆われた領域のアルベドは陸に比べて高いため、さらなる寒冷化をもたらす。この正のフィードバックをアイスアルベドフィードバックと呼ぶ。このフィードバックにより、ある太陽放射もしくはある二酸化炭素濃度にて、部分凍結状態から完全凍結状態への気候ジャンプが起こる。ハビタブルゾーンの外

側境界に関する先行研究では、中心星放射の低下もしくは二酸化炭素濃度の減少により引き起こされる完全凍結状態への気候ジャンプとしてハビタブルゾーン外側境界を決めていた。

大気中の二酸化炭素が増大した場合、惑星表面温度もその強化された温室効果により上昇することは、直感的にもよいだろう。しかしながら、地表面温度が一定だとしても、二酸化炭素濃度の上昇のため、射出できる惑星放射は低下する。加えて、二酸化炭素分圧が高くなった場合、可視領域におけるレイリー散乱が起こり、冷却効果をもたらす。よって、実質的に惑星気候を暖める二酸化炭素の温室効果には上限値が存在する。この温室効果の上限値において、惑星表面を温暖に保つことができる中心星放射の値を最大温室効果限界と呼ぶ。Kopparapu et al. (2013) による鉛直1次元放射対流平衡モデルの検討では、二酸化炭素濃度における最大温室効果は、二酸化炭素濃度が8 barであり、最大温室効果限界は $0.343 S_0$ と推定されている [2]。

そのような高二酸化炭素濃度で惑星表面温度が低い状況では、惑星大気中で二酸化炭素が凝縮し、雲を形成することが考えられる。二酸化炭素雲は、赤外領域で吸収がほとんどないが可視領域での散乱があるため、惑星を寒冷化させると考えられていた。Kasting et al. (1993) では、ハビタブルゾーンの外側境界の1つの候補として、二酸化炭素の凝縮を考慮し、 $0.53 S_0$ と見積もっている [1]。しかしながら、二酸化炭素雲は地表面からの惑星放射を散乱し惑星表面に返す散乱温室効果を持つことも指定されており、この効果を最大にするように見積もった場合、ハビタブルゾーンの外側境界は、 $0.17 S_0$ となる [5]。二酸化炭素雲が温室効果か冷却効果のどちらを持つかは雲の光学特性や粒径、分布、高度に依存しているため、議論が残っている。

### 3. ハビタブル惑星気候

これまで、鉛直1次元放射対流平衡モデルや南北1次元エネルギーバランスモデルで見積もられたハビタブル条件について紹介してきた。そこで見積もられたハビタブルゾーンという概念は、広く系外惑星科学分野で用いられており、系外地球型惑星観測を行う上で、1つの重要な指標となっている。しかしながら、モデルの性質上、それらは全球平均的な気候検討であり、物質の、特に水蒸気の空間的な不均一性を捉えることはできない。近年、3次元大気大循環モデル（3D General Circulation Model; GCM）による惑星気候検討が始まっており、計算機能力の向上も相まって、地球型惑星気候の理解は大きく前進している。本章では、惑星の空間的な不均一に注目し、ハビタブル惑星気候がどのように形成されているかを紹介する。

#### 3.1 ハビタブルゾーン境界

上記で議論していた1次元モデルでは、全球が海洋で覆われた惑星（海惑星と呼ぶ）が暗に仮定されていた。地球は、全球的に繋がった海洋を保持し、常に湿潤な大気を持っている。しかしながら、大気中の水蒸気の分布は大気循環により決まり、不均一性を持っているため、鉛直1次元モデルで仮定した水蒸気分布と大きく異なる。地球大気の場合、対流圏は3つの子午面循環（ハドレー循環、フェレル循環、極循環）で構成されている。ハドレー循環とは、赤道域の加熱により駆動されている循環であり、赤道域で上昇し、亜熱帯で下降する循環構造を持っている。大気中の水蒸気はこの大循環と共に移動するため、流れに沿った温度圧力を経験する。ハドレー循環の上昇流域（赤道付近）では、降雨が起こり、大気中から水蒸気が取り除かれる。そのため、ハドレー循環の下降流域では乾燥した気流になっている。

ハビタブルゾーン内側境界は、惑星が射出できる惑星放射に上限値（射出限界）の存在により決

まっていた。射出限界は大気中の水蒸気量で支配されているため、3次元大気大循環モデルを用いて、大気中の水蒸気分布を考慮する必要がある。Leconte et al. (2013) は、大気大循環モデル（the LMD generic global climate model）を用いて地球類似惑星が受け取る中心星光度を上昇させる数値実験を行い、暴走温室効果の発生する中心星光度を見積もった [6]。結果として、鉛直1次元放射対流平衡モデルにより見積もられた射出限界よりも大きな惑星放射をハドレー循環の下降流域から射出できることがわかり、暴走温室効果の発生する中心星光度は大きくなることを示した。

#### 3.2 惑星の水量とハビタブル気候

これまでのハビタブル惑星気候は、“地球”に基づいた仮定の下、検討されてきた。しかしながら、惑星の保持する水量は様々だろう。水量が少ない惑星の場合、地球のような水量を持った海惑星と大きく異なった気候を示すことがわかっている [7]。地球のような海惑星の場合、表面における水輸送により惑星表面水分分布が決まっている（蒸発が降水よりも卓越した領域であっても、蒸発した水は海洋を通して供給される）。水の少ない惑星（陸惑星と呼ぶ）は、大気循環による水輸送により、惑星表面温度の低い領域（極付近）に水蒸気は輸送され、降雨と蒸発が局所的にバランスし、水の局在化が起こることが特徴である。

図2は、海惑星と陸惑星の中心星放射・惑星放射の関係を示している。前述したように、湿潤な大気から射出される惑星放射は射出限界を持っている。そのため、赤道付近では、大きな中心星放射を受け取り、およそ射出限界で惑星放射を射出している。低緯度で余ったエネルギーは中高緯度に運ばれ、そこから中心星放射より強い惑星放射を射出する。このことにより、惑星全体のエネルギー収支をバランスさせている（図2(a)）。中心星放射が増大すると、惑星は全球的に射出限界で惑星放射を射出することになる（図2(b)）。全球平均の中心星放射が射出限界を超えると、余った



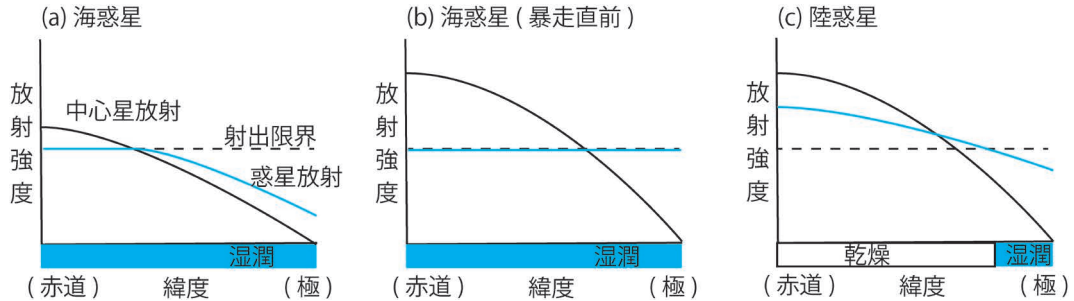


図2 海惑星と陸惑星における放射バランスの概念図. (a)と(b)は全球湿潤な表面の海惑星を仮定し, (c)は低緯度域が乾燥した陸惑星を仮定している. 湿潤な大気は射出限界を超える惑星放射を出せないため, 低緯度域から高緯度域にエネルギーを輸送することで, 放射収支をバランスさせている (a). 強い中心星放射を海惑星が受け取ると, ある時点で, 全球的に射出限界で惑星放射を出すことになる (b). 低緯度域が乾燥している陸惑星は, 低緯度域から射出限界より強い惑星放射を放つことができる (c).

エネルギーは惑星表面の水の蒸発に使われることになり, 可視領域で放射する高温状態になる (暴走温室状態). 水の少ない陸惑星の場合の放射収支は図2(c)で示されている. 水の少ない陸惑星は, 高緯度に水の局在化が起こり, 低緯度域は乾燥している. そのため, 低緯度域の大気は乾燥しており, その大気は射出限界を超える惑星放射を放射することができる. よって, 海惑星が暴走温室状態になってしまう強度の太陽放射を陸惑星が受け取ったとしても, 陸惑星の放射収支はバランスし, 惑星表面に液体の水を維持することができる [7].

近年の大気大循環モデルを用いた研究結果から, 陸惑星気候の暴走温室効果の発生には, 惑星表面の水分布が重要であることがわかってきた. Kodama et al. (2019) では, 3ケースの水分布を考慮し, 大気大循環モデルを用いて, 暴走温室に突入する中心星放射フラックス (暴走温室限界) を調べた. 東西一様な水分布では, 極からある緯度まで常に湿った領域を考え, 水分布を作成した. この場合, 陸海比が増大すると,  $1.3 S_0$  (海惑星での値) から  $1.8 S_0$  まで大きく変化することを示した (図3) [8]. 陸海比0.4までは, 惑星は海惑星のように振る舞い, 海惑星の暴走温室限界で暴走温室状態に陥った. しかしながら, 陸海比

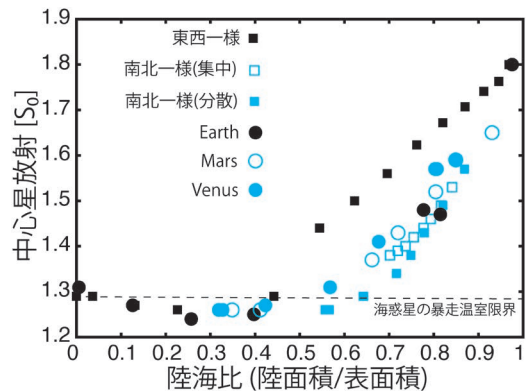


図3 水分布と暴走温室限界の関係. 乾燥領域の増大に伴い, 暴走温室限界は上昇する. ある陸海比以下の場合 (この場合は0.4), 大気循環により大気が湿潤になるため, 海惑星の暴走温室限界をとる (破線は全球海惑星の場合での暴走温室限界).

0.4以上では, 陸海比の増大と共に暴走温室限界は増大していく. 南北一様な水分布は, 両極を繋いだ湿った領域を等間隔に置いた場合 (分散) と連続的に置いた場合 (集中) に分けて作成した. この場合の暴走温室限界も, 東西一様な水分布と同じ程度の陸海比まで, 気候は海惑星的に振る舞う. 陸海比が増大すると, 暴走温室限界は徐々に増大するが, 東西一様な水分布に比べるといくらか低い. 東西一様な水分布の場合は低緯度域が乾燥

しているのに対し、南北一様分布の場合は低緯度域が部分的に湿っている。射出限界の発生は大気中の水蒸気量により決まっていた。南北一様分布の場合、低緯度域の大気が湿潤になり、暴走温室限界が低くなった。地球、金星、火星地形を用いた水分分布の場合の暴走温室限界は、東西一様分布と南北一様分布の場合の暴走温室限界の間に位置し、他の水分分布と同様に、海惑星の値から増大していくことがわかった。

惑星表面の水分分布は、惑星の地形と水量に強く依存するため、惑星表面に水を保持する惑星のハビタブルゾーンの内側境界は大きく変化することがわかった。すなわち、ハビタブルゾーンはシャープな境界を持つものではなく、惑星の個性を反映するブロードな境界であることを意味している。

ハビタブルゾーン外側境界についても、水量の少ない陸惑星は海惑星と異なる気候的な特徴を示す。前述したように、ハビタブルゾーンの外側境界は、二酸化炭素による最大温室効果や雲の形成により決まっていた。全球凍結状態に陥る際に重要なプロセスとして、アイスアルベドフィードバックを紹介した。惑星のアルベドは、惑星の表面状態、雲分布、そして氷床分布で決まっている。Abe et al. (2011) は、中心星放射を下げた場合の海惑星と陸惑星の降雪と雪水分布を調べ、ハビタブルゾーン外側境界に対応する全球凍結限界を調べた [7]。現在の太陽の中心星放射の値の場合、海惑星の方が陸惑星より温暖である。陸惑星は大気が乾燥しているため、海惑星に比べると水蒸気による温室効果が弱いためである。しかしながら、中心星放射を下げていくと、海惑星の表面温度も低温になり、大気中の水蒸気量は少なくなるため、水蒸気による温室効果が得られなくなる。一方で、陸惑星は乾燥しているため、雲が少なく、積雪も少ない。よって、海惑星と陸惑星のアルベドを比較すると、陸惑星のアルベドの方が低くなる。よって、凍結限界付近で

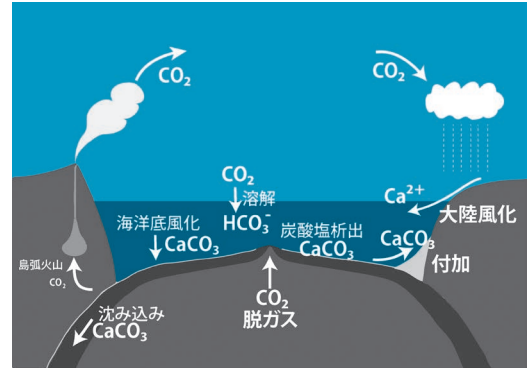


図4 炭素循環の概念図。

は、陸惑星の方が温暖な環境を維持することができる [7]。大気大循環モデルを用いた見積もりでは、海惑星の完全凍結限界は  $0.9 S_0$  に対し、陸惑星の完全凍結限界は  $0.77 S_0$  と見積もられている。

多くの先行研究では、ハビタブルゾーンの境界について焦点を当て、研究されてきた。しかし、ハビタブルゾーンの中に地球型惑星があったとしても、ハビタブルな環境（惑星表面に液体の水を維持している環境）を保てるとは限らないだろう。例えば、二酸化炭素濃度が低い場合、惑星はハビタブルゾーンにあっても、全球凍結状態になる。

大気中の二酸化炭素量は、地球を考えた場合、炭素循環を通して変化してきたと考えられている (図4)。二酸化炭素は火山活動などによる脱ガスにより大気中に放出され、ケイ酸塩の風化により大気中から除去される (e.g.,  $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$ )。重炭酸イオンなどは海洋底に沈澱し (e.g.,  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ )、海洋プレートの沈み込みによりマントル中に移動、もしくは、火山活動を通して二酸化炭素として大気中へと戻る。化学風化により、 $\text{Ca}^{2+}$  の供給フラックスは惑星表面温度に強く依存しているが、火山活動は惑星表面温度には依存していない。よって、大気中の二酸化炭素の供給・除去のプロセスは、その惑星表面温度の依存性により、負のフィードバック機構を持ってい

る。このフィードバックはウォーカーフィードバックと呼ばれる [9]。このフィードバック機構により、二酸化炭素の供給と除去が一致するような温度になるように、大気中の二酸化炭素量が調整される。地球における二酸化炭素の大気中への供給は、プレートテクトニクスにより駆動されている。よって、系外地球型惑星における二酸化炭素量の挙動を考える時、すでに我々はプレートテクトニクスが活発に活動している惑星を仮定していることになる。

二酸化炭素の供給フラックスが小さい場合、アイスアルベドフィードバックにより惑星が全球凍結状態へ陥る時間スケールは、ウォーカーフィードバックによる二酸化炭素濃度調整の時間スケールに比べ十分短いため、全球凍結状態に陥ってしまう。全球凍結中では、徐々に二酸化炭素濃度が増大してゆき、ある時点で全球凍結状態から脱出する。しかし、二酸化炭素除去フラックスは温暖な環境では高いため、再び全球凍結状態に陥ってしまう。このように、二酸化炭素の供給フラックスが小さい場合、ハビタブルゾーン内であっても、全球凍結状態と温暖な状態を交互に繰り返す、リミットサイクルを示してしまう可能性がある [10]。

大陸の存在も惑星の表層環境に大きく影響している。大陸の地形を十分覆い隠すほど水量が多い惑星の場合、大陸上に炭酸塩を蓄えることができず、加えて、大陸上で起こっていた大陸風化が起これなくなる。そのような環境では、二酸化炭素除去プロセスが効果的に機能しない。加えて、海底では高圧水が形成してしまうため、海洋底風化も遮断される。脱ガスによる二酸化炭素供給の結果、水量の多い惑星の表面は高温になることが予想される。しかし、中央海嶺付近での固液共存状態が起こることを考慮した場合、海洋を通して大気中の二酸化炭素は除去され、結果として全球凍結状態に陥る可能性も示されている [11]。

## 4. 系外ハビタブル惑星気候

ここまで、これまで考えられてきた地球型惑星のハビタブルな気候について紹介してきた。“ハビタブル”という状態は、大気、海洋、氷床、内部活動など、様々なサブシステムが1つの気候システム中で機能し、構成されているものである。本章から、現在盛んに議論されている、系外惑星系におけるハビタブル惑星とその気候について議論する。

### 4.1 M型星まわりの地球型惑星

観測精度の制約から、太陽型より軽く暗いM型星周りのハビタブル惑星探しが精力的に行われている。従来のように、1次元放射対流平衡モデルによるM型星周りのハビタブルゾーンを考えると、M型星周りでは中心星近傍にハビタブルゾーンが位置する。中心星からの潮汐の効果を考えると、その領域に位置している地球型惑星は潮汐固定状態にあると予想される。潮汐固定状態とは、惑星の自転周期と公転周期が同期し、恒久的な昼面と夜面を持つ状態である。

潮汐固定された、液体の水を惑星表面に保持している惑星の気候状態は、大気大循環モデルを用いて調べられ始めた。Yang et al. (2013) は潮汐固定された地球型惑星の気候を大気大循環モデルを用いて調べ、雲によるアルベドの上昇により、1次元放射対流平衡モデルで見積もられた暴走温室限界よりも大きな中心星放射下でも液体の水を惑星表面に安定して維持することができると示した (図5) [12]。このような環境下では、潮汐固定された海惑星の昼面の太陽直下点付近において、強い対流が発生し、厚い雲を形成する。その雲が惑星アルベドの増大を引き起こし、惑星の表面温度を下げる。この結果はM型星周りのハビタブル惑星を考える上での大気循環の重要性を示しており、シンプルな1次元モデルで見積もられたハビタブルゾーンでは気候推定ができないということの意味している。

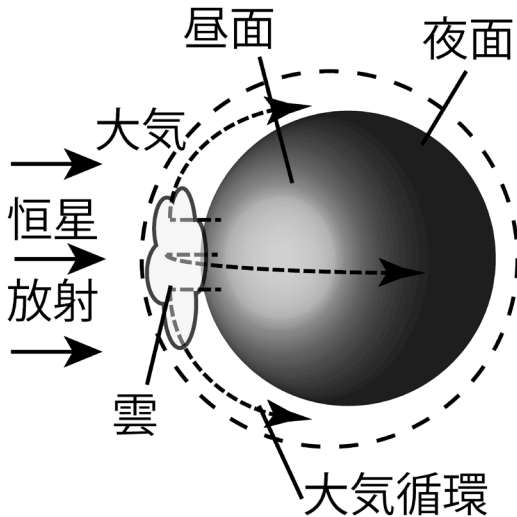


図5 潮汐固定された地球型惑星の大気循環と雲の概念図。

Yang et al. (2013) の計算設定 [12] は、自転周期 (= 公転周期) 60 日の惑星についての気候検討であったため、ケプラー第3法則を満たしておらず、現実的なものとは言えなかった。惑星の自転周期は惑星大気循環をコントロールする重要な要素である。近年、中心星放射と惑星の自転周期をセルフコンシステントに与えた大気大循環モデルによる気候検討が行われている。

Haqq-Misra et al. (2018) [13] では、赤道ロスビー変形半径 ( $\lambda_R$ ) とライン長さ ( $L_R$ ) を用いて、潮汐固定された惑星の気候レジームを3つに分けた。3,300–4,500 K の有効温度の恒星周りの公転周期が20日以上 of 惑星は、 $\lambda_R >$  惑星半径 ( $R_p$ ) かつ  $L_R > R_p$  であり、昼面の恒星直下点における強い対流と昼面から夜面への循環を示す (slow rotation regime)。反対に、有効温度が3,000 K 以下の恒星周りを公転周期5日以下で周る惑星の場合、 $\lambda_R < R_p$  かつ  $L_R < R_p$  となり、恒星直下点での対流は弱く、高層でジェットを持ち、帯状の雲形成を示す (rapid rotation regime)。そ

れら気候レジームの間は、3,000–3,300 K の有効温度の恒星周りを ~5–20 日で公転する惑星で現れ、高高度ジェットと恒星直下点での上昇気流で特徴付けられる気候を示す ( $\lambda_R < R_p$  かつ  $L_R > R_p$ )。このような気候レジームの検討によって、大気循環による雲の形成・分布とジェットの有無により、ハビタブルゾーン内側境界 (暴走温室限界) が大きく変化することが示された。湿潤温室限界を考えると、上層大気の水蒸気量が重要となる。slow rotation regime の惑星は昼面の恒星直下点付近における上昇気流を持ち、大気上層に水蒸気を運ぶことができるが、rapid rotation regime では大気上層への水蒸気輸送はできない。よって、3,000 K 以下の恒星周りでは、湿潤温室状態の解は未だ示されていない [14]。

#### 4.2 TRAPPIST-1系の惑星

TRAPPIST-1系は、7つの地球と同程度の半径と質量を持つ惑星を保持し、それらがハビタブルゾーンの中に位置していることから注目を集めている惑星系である\*1。大気大循環モデルを用いて各惑星の気候的な特徴が予想されているため、今後の観測とのすり合わせにより、より詳細な検討が期待される。ここでは、現段階での予想されている TRAPPIST-1 惑星の気候的特徴を簡単に紹介する。

TRAPPIST-1系の内側の3つの惑星 TRAPPIST-1b, c, d は、中心星からの放射が強く、自転周期が短い。気候状態は、rapid rotation regime に分類され、恒星直下点における厚い雲形成により冷却効果は保持していないだろう。そのため、全球的に繋がった海洋を安定に維持することはできず、暴走温室状態になってしまうと考えられる。TRAPPIST-1d は、ハビタブルゾーンの内側境界付近に位置しているため、条件によってはハビタブルな解があるかもしれない。

一方、外側の3つの惑星 TRAPPIST-1f, g, h は、

\*1 TRAPPIST-1 惑星系の詳細については本特集の堀安範氏の記事を参照。



中心星放射が弱いため、温室効果気体の有無がハビタブルな環境を形成するかどうかを分ける。TRAPPIST-1fとgは火星よりわずかに大きな惑星であるため、数気圧の二酸化炭素を維持することが可能であり、ハビタブルな環境を形成することはできる。TRAPPIST-1hは、夜面で二酸化炭素の凝結が起こる可能性がある。昼面と夜面のエネルギー再分配によるが、エネルギー再分配効率が低い場合、夜面で二酸化炭素が凝結してしまい、大気中から二酸化炭素を除去してしまう。その場合、効果的な温室効果を得ることができないため、ハビタブル条件を満たすことは難しくなるだろう。

惑星の大気組成や大気量についてはまだ明らかではないが、中心星と惑星の距離という観点で、TRAPPIST-1系の惑星たちの中で最もハビタブル環境を維持するのに適している惑星は、TRAPPIST-1eであると考えられている。TRAPPIST-1eは、水蒸気以外の温室効果気体を必要とせず、液体の水を惑星表面に維持できる気候を形成することができると推定されている [15]。成層圏のメタンや光化学反応により形成されるヘイズなど、冷却効果があった場合は惑星表面に液体を保持する条件は変化するが、この惑星は最も注目されているハビタブル惑星候補であり、今後盛んに検討され、より詳細な情報が得られると期待されている。

### 4.3 Proxima Centauri b

Proxima Centauri bもハビタブル惑星候補として注目されている惑星である。この惑星も潮汐固定状態になっていると考えられ、先行研究において、大気大循環モデルを用いて水循環が検討されており、水が夜面で氷として蓄積されると考えられている。また、1気圧以上の二酸化炭素が大気中に存在していれば、夜面であっても液体の水を惑星表面で維持できると予想されている。年齢の不確定性を考慮すると、3:2の軌道共鳴になっている可能性がある。その場合、約10 mbarの二酸

化炭素と1気圧の $N_2$ が大気中に存在していれば、全球凍結状態になることはないと推定されている [16]。

## 5. まとめと将来課題

系外惑星科学の中で、『ハビタブル惑星の検出とその特徴付け』は1つのゴールであり、今後も精力的に進められ、生命というキーワードに繋がる大きな課題であるだろう。それは、我々の地球とは何者であるかを比較検討できる、重要なステップになると考えられる。

慣例的に、ハビタブル惑星の検討はハビタブルゾーンという概念を用いて行われてきた。ハビタブルゾーンとは、惑星表面に液体の水が維持できる中心星からの範囲と定義されている。ハビタブルゾーンの内側境界に関して2つの定義が考えられており、1つが暴走温室効果の発生、もう1つが湿潤温室効果の発生である。一方、ハビタブルゾーンの外側境界は、二酸化炭素の温室効果の限界で議論されている。ハビタブルゾーンという概念は、最終的には惑星が受け取る中心星放射フラックスで表せるため、系外惑星観測においても便利である。しかしながら、これまでのハビタブル惑星の検討の多くは、暗に地球のような、表面が湿潤でプレートテクトニクスが活発に機能している惑星を仮定していることに注意することが必要である。例えば、水量が少ない陸惑星の場合、十分な水量を保持する海惑星とは異なる惑星気候をとり、ハビタブルゾーンの内側境界と外側境界も大きく変化することがわかっている。また、プレートテクトニクスを起因としている炭素循環とその負のフィードバック機構は、ハビタブルゾーン内の惑星気候を温暖に保つと考えられていたが、そのメカニズムにも限界があることがあるとわかってきた。加えて、水量の多い惑星の場合、海洋底における高圧氷の有無や、その熱輸送による融解により、ハビタブルゾーン内であっても全球凍結状態に陥る解があることが示されてい

る。よって、単にハビタブルゾーンに位置している惑星であることが、ハビタブル惑星である必要条件であるが、十分条件ではないことがわかってきている。大気組成や大気量、惑星大気中の化学プロセスを考えると、我々はまだ水を保持する惑星の多様性を理解できていないことがわかる。しかしながら、観測技術の向上と惑星発見数の増大は、潜在的なハビタブル惑星候補の増大をもたらすだろう。よって、地球とは異なる、“地球のような”惑星を理解するため、様々な課題が残っている。特に、惑星大気の進化を考慮する研究が、我々は今現在のどのステージの惑星を見ているか？を検証するためには必要であるだろう。大気組成の進化に関係するような、惑星内部の進化（熱史）や大気の散逸プロセス、そして海洋形成も重要な研究課題である。また、数値計算の問題から系統的な検討がまだ始まったばかりであることを考えると、惑星の気候レジームと観測的な特徴の関係をより詳細に明らかにすることが次のステップとして挙げることができる。ハビタブル惑星の気候形成を含む、ハビタブル惑星の条件の制約はこれから大きく前進すると考えられ、それは真にハビタブルな惑星の検出に向けた重要なステップとなると考えられる。

## 謝 辞

今回、本稿の執筆機会をくださり、本稿に対し有益なコメントをいただいた、福井暁彦博士に感謝いたします。また、校閲にてコメントをいただいた岩井一正博士に感謝いたします。加えて、日常から議論を交わし、コメントをいただいた、門屋辰太郎博士と中山陽史博士をはじめとする、共

同研究者の皆様にごここで感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Kasting, J. F., et al., 1993, *Icarus*, 101, 108
- [2] Kopparapu, R. K., et al., 2013, *ApJ*, 765, 131
- [3] Nakajima, S., et al., 1992, *Atmos. Sci.*, 49, 2256
- [4] Tajika, E., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 443
- [5] Mischna, M. A., et al., 2000, *Icarus*, 145, 546
- [6] Leconte, J., et al., 2013, *Nature*, 504, 268
- [7] Abe, Y., et al., 2011, *Astrobiology*, 11, 443
- [8] Kodama, T., et al., 2019, *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 2306
- [9] Walker, J. C. G., et al., 1981, *J. Geophys. Res. Oceans*, 86, 9776
- [10] Kadoya, S., & Tajika, E., 2014, *ApJ*, 790, 107
- [11] Nakayama, A., et al., 2019, *MNRAS*, 488, 1580
- [12] Yang, J., et al., 2013, *ApJ*, 771, L45
- [13] Haqq-Misra, J., et al., 2018, *ApJ*, 852, 67
- [14] Kopparapu, R. K., et al., 2016, *ApJ*, 819, 84
- [15] Turbet, M., et al., 2018, *A&A*, 612, A86
- [16] Turbet, M., et al., 2016, *A&A*, 596, A112

## Climates of Habitable Planets

**Takanori KODAMA**

*Komaba Institute for Science, Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo, 3-8-1, Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan*

Abstract: The advancement of observation technologies provide candidates for potentially habitable exoplanets where liquid water could stably exist on their surface. The habitability of exoplanets has been actively discussed based on the concept of the habitable zone using one-dimensional radiative-convective models. Recent studies used a three-dimensional general circulation model to discuss the climate for habitable planets and showed a diversity of habitable climates. Here, I review the climates of terrestrial exoplanets and discuss their habitability.