

系外惑星「遠い世界の物語」その10 ～ハビタブル惑星の現状とこれから～

小玉 貴則¹，門屋 辰太郎²

(要旨) 観測精度の向上により，惑星表面に液体の水を保持できる惑星(ハビタブル惑星)の検出が現実的になりつつあり，そのような惑星の理論的研究が盛んに行なわれている．最近の研究から，惑星表面に液体の水のある惑星の気候は，その水量や惑星の気候システムによって，ハビタブルゾーン内であっても大きく変わることがわかってきた．これは，水を保持する惑星が持つ多様性の側面を表している．本稿では，系外惑星科学におけるハビタブル惑星の考え方や気候形成についてレビューし，議論する．また，近年注目を集めている系外惑星のハビタビリティの検討も紹介する．

1. 生命を宿す星

“ハビタブル”という言葉聞いたことがあるだろうか？観測精度の飛躍的な向上の結果，現在までに多くの系外惑星が検出され，その中には地球型惑星とおぼしき天体も存在する．そこで生まれる最も重要かつ興味をそそる疑問は、『地球のような生命を宿す惑星(ハビタブル惑星)はあるのか？』であるだろう．近年，生命の発見に向けて，地球に類似した惑星の探索が世界中で行われている．しかし，地球型惑星の発見それ自体が生命の発見に直接つながるわけでは当然なく，生命の存在に必要な条件を検討することが重要である．生命の存在に必要な条件を考える上で，まずは地球上に存在する生命を想定する．地球上に存在する生命と一言で言っても，その居住環境や生態には幅広い多様性が存在する．しかし，こうした多様性の中にも変わらない点がある．それは液体の水を必要とするということである．液体の水は生命活動において必要不可欠な物質であることから，ハビタブルな惑星とは，まず液体の水を惑星表面に維持できる惑星と考えられている．

惑星表面における水の存在は，その惑星が持つ気候により決まる．このため，系外惑星の気候を検討することが，ハビタブル惑星(以下では，惑星表面に液体の水がある惑星)を議論するために，重要である．本稿では，近年のハビタブル惑星気候の研究のレビューを通して“ハビタブル惑星”の現状の理解を示し，曖昧にとられがちな系外惑星科学における“ハビタブル”という言葉の定義を明確にすることを目的とする．

2. ハビタブルゾーン(生存可能領域)

ハビタブルな環境を維持する惑星について議論する際，最もよく用いられる概念が『ハビタブルゾーン』である[1, 2]．ハビタブルゾーンとは，惑星表面に液体の水を安定に維持することができる，中心星からの距離の範囲である．中心星からの距離が短い場合，惑星が受ける強い恒星放射により惑星表面の水は全て蒸発してしまう．その反対に，中心星からの距離が長い場合には，惑星が受ける恒星放射が弱く，惑星表面を十分に温めることができないため，惑星表面の水は全て凍ってしまう．惑星表面に液体の水を維持するためには，恒星放射がある範囲内にある必要があり，惑星がそのような恒星放射を受ける領域がハビタブルゾーンと呼ばれる(図1)．先行研究では，これらの条件の

1. 東京大学大気海洋研究所
2. ワシントン大学
koda@aori.u-tokyo.ac.jp

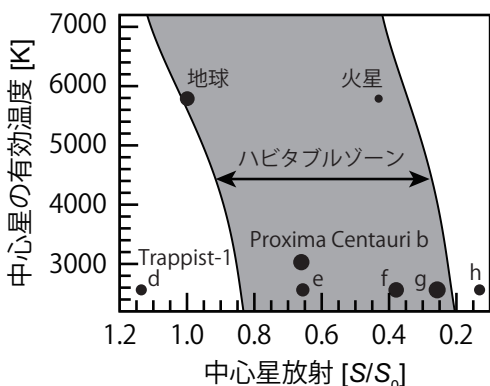


図1：鉛直1次元放射対流平衡モデルで見積もられたハビタブルゾーン。Kopparapuらによる計算をもとに作成[2]。各点は惑星が受け取っている恒星放射と中心星の有効温度を示している。 S_0 は現在太陽定数を表している。

境界値が定量的に議論されてきた。

2.1 ハビタブルゾーン内側限界

(1) 暴走温室の発生

表面に十分な水を保持し、大気が湿潤である惑星では、射出できる惑星放射に上限値(射出限界)が存在することがわかっている。通常、表面温度が上昇するとそれに応じて惑星放射も増加する。しかし、湿潤な惑星の表面温度が高温になると、大気の鉛直構造が水蒸気の飽和蒸気圧曲線に漸近する。この時、光学的厚さが1付近(i.e., 実質的に惑星放射の大きさを決める領域)の温度が一定となるため、惑星放射も一定の値となり、惑星放射はこの値を超えることができない[3]。

仮に表面に液体の水を保持する惑星が射出限界を超える恒星放射を受け取った場合、惑星放射は射出限界を超えることができないため、余ったエネルギーは惑星表面の水の蒸発に使われる。水蒸気は強い温室効果気体であるため、表面温度はさらに上昇し、水の蒸発を促進する。この結果、水が全て蒸発するまで表面温度の上昇が続くことになる。このような状況を暴走温室状態と呼ぶ。このように、暴走温室効果が発生すると、惑星表面から液体の水が失われる(i.e., ハビタブルな環境から外れる)。したがって、惑星が射出限界に等しい恒星放射を受ける、中心星からの距離がハビタブルゾーンの内側境界となる。

(2) 湿潤温室効果の発生

太陽型の恒星はその年齢とともに光度を増大させる

ことが知られている。恒星からの放射は、惑星の気候を決める重要な外力であるから、恒星の進化を考慮した大気進化を考えることが必要となる。現在の地球の大気では、地表面付近の水蒸気は、対流圏界面に運ばれる間に凝結するため、大気上層への水蒸気の輸送が制限され、対流圏界面で水蒸気混合率は最も小さくなっている。この機構は、コールドトラップと呼ばれている。一方、恒星放射が大きいと、惑星表面温度が上昇し、対流圏界面が上昇する。その結果、飽和水蒸気分圧が大きくなるため、水蒸気が凝結せず、コールドトラップが消失する。これにより、上層大気への水蒸気輸送が起こる。大気上層の水蒸気は光解離し、その結果生じる水素が恒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率が $\sim 3 \times 10^{-3}$ の場合、地球海洋水量を保持する惑星を想定すると、45億年間で惑星表面の全ての水を失う。この時の大気上層での水蒸気混合率が達成された状態を湿潤温室状態と呼ぶ[1]。

まとめると、ハビタブルゾーンの内側境界は2つの境界が考えられている。1つは、暴走温室状態により決まっている瞬間的な内側境界であり、もう1つは、湿潤温室状態により決まっている連続的な内側境界である。鉛直1次元放射対流平衡モデルでの見積もりでは、暴走温室状態の発生は $1.06 S_0$ (S_0 : 現在地球が受け取る太陽放射)となり、湿潤温室状態の発生は $1.015 S_0$ となる[2]。両者の状態を発生させる恒星光度を比べると、後者の方が小さい。よって、水を保持した惑星は、恒星の光度進化に伴い、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。しかしながら、湿潤温室状態の定義は惑星の保持する水量により決まっている。ここには、多くの先行研究で置いている、地球のような惑星という大前提が存在している。よって、系外地球型ハビタブル惑星を考える上で、注意が必要であるため、第3章で水量とハビタブルな気候の関係は議論することにしよう。

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は、惑星が全球凍結状態を免れ、温暖な環境(i.e., 惑星表面に液体の水が露出している状態)を維持できる最小の恒星放射を受ける中心星からの距離として定義される[1, 2]。しかし、先述した通り、大気中の水蒸気量は強い温度依存性を

持ち、この温度依存性によって水蒸気の温室効果には正のフィードバックが働くため、低い恒星放射条件で惑星を温暖に保つことは困難である(例えば現在の地球が受ける恒星放射でも、水蒸気以外の温室効果がなければ全球凍結状態になる)。そこで、先行研究では、主に二酸化炭素(CO_2)の温室効果を考慮して、ハビタブルゾーンの外側境界の議論がなされてきた[1, 2]。

大気中の CO_2 分圧($p\text{CO}_2$)が増加すれば温室効果も強くなり、地表面温度が一定でも大気上端での惑星放射は低下する。しかし、 $p\text{CO}_2$ が大きく(~ 10 bar)、飽和状態へ近づくと、惑星放射は一定値へ収束する。一方、 $p\text{CO}_2$ の増加は、可視領域のレイリー散乱を強化し、惑星アルベドの増加を伴う。こうした CO_2 のもつ温室効果と冷却効果の競合により、 CO_2 の実効的な温室効果には上限が存在する。このような CO_2 の温室効果が最大になる条件で、惑星を温暖に保つことができる恒星放射の値を最大温室効果限界と呼ぶ[1]。鉛直一次元放射対流平衡モデルを用いると、 $p\text{CO}_2$ が8 barの時に温室効果は最大となり、最大温室効果限界は $0.343 S_0$ と推定されている[2]。

ハビタブルゾーンの外側境界で仮定されているような、高 $p\text{CO}_2$ かつ低温な環境下では大気上層で CO_2 が凝縮し、雲を形成することが予想される。 CO_2 雲は可視放射を散乱する一方で赤外放射をほとんど吸収しないため、強い冷却効果を持つ。このため、Kastingらは CO_2 雲の形成がハビタブルゾーンの外側の候補の一つ(CO_2 凝縮境界)であると考えた[1]。鉛直一次元放射対流平衡モデルによると、 CO_2 凝縮境界は $0.53 S_0$ と推定されている[1]。一方、近年の研究によると CO_2 雲は地表面からの放射を散乱し地表面へ戻すことで温室効果(散乱温室効果)を持ちうるということが指摘されている[e.g., 4]。 CO_2 雲の冷却効果と散乱温室効果のどちらが卓越するかは雲の光学的厚さや粒径、分布によって決まる。仮に散乱温室効果を最大に見積もると、恒星放射が $0.17 S_0$ まで下がっても惑星は温暖に保たれうると推定されている[4]。

上記の通り、ハビタブルゾーンの外側境界については、主に CO_2 雲の持つ温室効果の不確定性のために、大きな不定性($0.17\sim 0.53 S_0$)を持つ。こうした議論を進めるためには、従来のような鉛直一次元モデルによる議論ではなく、雲の形成やその温室・冷却効果を取り扱える高次元のモデルが必要である。 CO_2 雲を取り

入れたGCMによる計算も数例なされているが、これらは主に地球史を想定した、比較的高い恒星放射条件を想定したものである。このため、ハビタブルゾーンの内外境界に関する議論は十分ななされているとはいえず、今後の課題となっている。

3. ハビタブル気候の形成

3.1 惑星の水量とハビタブル気候の関係

従来、水を惑星表面に保持するハビタブル気候の推定は、鉛直1次元気候モデルにより行われてきた。しかし、近年、計算能力のめざましい向上に後押しされ、3次元大気大循環モデルによるハビタブル気候の検討がされはじめている。これらのモデルの最も大きな違いは、1次元気候モデルは空間的に均一な表面や水蒸気分布を仮定しているのに対し、3次元気候モデルは空間的に不均一な表面や水蒸気分布を考慮できる点にある。こうした表面状態の不均一性は、特に惑星気候の季節変化を考慮する場合に、重要である。ここでは、表面の水分布の不均一性に注目し、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。

地球は全球的に繋がった海洋を持っており、惑星大気は湿潤に保たれている。前述の通り、このような全球的に湿潤な惑星が強い恒星放射を受ける場合、惑星放射は射出限界を超えることができないため、暴走温室状態に陥ってしまう。

一方、水量が少ない惑星を考えた場合、暴走温室の発生条件が異なることが3次元GCMを用いた数値計算により明らかになってきた。水が少ない惑星の場合、大気による水蒸気輸送によって、惑星表面温度が低い領域(極付近)に水が局在化する可能性がある。このような、大気輸送で水が局在化した気候状態を陸惑星気候と呼ぶ。陸惑星気候では、赤道域の大気は乾燥するため、結果的に赤道域では射出限界より強い恒星放射を放つことができる。このため、全球的に水で覆われた地球のような惑星より大きな恒星放射を受け取っても、惑星表面に水を安定に維持できる。つまり、水の少ない惑星の方が広いハビタブルゾーンをとることができる[5]。

最近の結果から、陸惑星気候の内側限界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。これは、

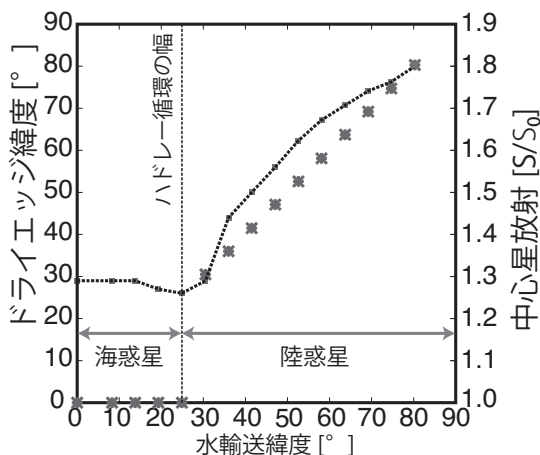


図2：暴走温室限界と水分布の関係。惑星表面の水分布を水輸送緯度として与え、その後大気中の水蒸気輸送を計算し、降雨により地表が湿潤になった境界をドライエッジ緯度とした(図中の米印)。ドライエッジ緯度が0度の場合、惑星表面が赤道まで湿潤になったことを意味している。破線は、各水分布における暴走温室限界における中心星放射を表している。

大気を湿潤にするためには、降水フラックスより蒸発フラックスが大きな地域に液体の水が存在することが必要であるからである。経度方向に一様な水分布を仮定したGCM計算によると、水分布の下端緯度の増加(i.e., 水が極域に局在する)に従い、暴走温室限界は約 $1.3 S_0$ から $1.8 S_0$ まで増大することがわかった(図2) [6]。これらの値は、先行研究により調べられてきた海惑星気候での暴走温室限界と陸惑星気候での暴走温室限界に、それぞれ対応する。1次元モデルで予想された暴走温室限界は $1.06 S_0$ であるが、3次元大気循環モデルから見積もられた暴走温室限界は、大気中の水蒸気の不飽和領域のため、大きな値(約 $1.1 S_0$)をとることがわかっている。図2では、海惑星の暴走温室限界は $1.3 S_0$ と見積もられているが、これは、少ない水量での暴走温室限界を見積もるために、表面のアルベドと熱容量を砂漠の値を用いているから生まれた違いである。また、海惑星気候と陸惑星気候の境界はハドレー循環の幅により決まっていることがわかった。これは、水分布の最も低緯度の端で蒸発した水蒸気がハドレー循環により赤道域まで運ばれ、大気を湿潤にすることで、惑星放射を射出限界以下に制限していることによる。

惑星表面の水分布は、惑星の水量と惑星の地形に強く依存している。地球の地形を仮定し、表面に存在す

る水を増やす実験をした場合、ハドレー循環の幅まで水が張り出すためには、現在の地球の海洋水量の約1% ($\sim 10^{16} \text{ m}^3$)が必要であることがわかった。金星の地形を仮定した場合には、地球地形と同じような水量で水分布がハドレー循環に達する。一方、火星地形を仮定すると、臨界の水量は約 10^{14} m^3 となる [6]。

このように、水分布は惑星の地形と水量に強く依存し、また水分布によってハビタブルゾーンの境界も大きく変化する。つまり、ハビタブルゾーンはシャープな境界を持つ領域ではなく、惑星の個性を色濃く反映したブロードな境界を持つ。

このように近年GCMを用いた気候推定がされ始めているが、3次元大気大循環モデルにも注意しなくてはならない点がある。それは、大規模な計算にとって宿命である、計算コストの問題である。そのため、現状では、短期間($\sim 10^2$ 年)の積分で解が得られるような計算が主に行われており、暴走温室状態の条件の見積もりはされてきているが、長期積分が必要な全球凍結状態の条件の見積もりはあまり報告されていないのが現状である。3次元大気大循環モデルを用いた検討によって、明らかになる惑星の非一様性は地球型惑星の持つ多様性を色濃く映し出すため、これから期待できる分野である。

3.2 炭素循環による温暖な環境の維持とその限界

先述の通り、従来考えられてきたハビタブルゾーンの外側境界は、大気中に十分量の CO_2 が存在することを仮定して議論がなされてきた。一方で、たとえハビタブルゾーンの中に惑星があったとしても、 $p\text{CO}_2$ が低ければ、惑星は全球凍結状態となる。つまり、ハビタブルゾーン内の惑星の気候を考えるためには、大気中の温室効果気体(ここでは CO_2)の量の変動メカニズムを理解することが重要である。

地球を考えると、大気中 CO_2 量は炭素循環を通じて変化してきたと考えられている [e.g., 7]。炭素循環において、 CO_2 は火山活動を通じて大気に供給され、ケイ酸塩の風化(e.g., $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$)によって大気から除去される。この反応で生じた重炭酸イオンは海洋底に沈殿し(e.g., $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)、海洋底プレートの沈み込みに伴ってマントルに取り込まれ、あるいは

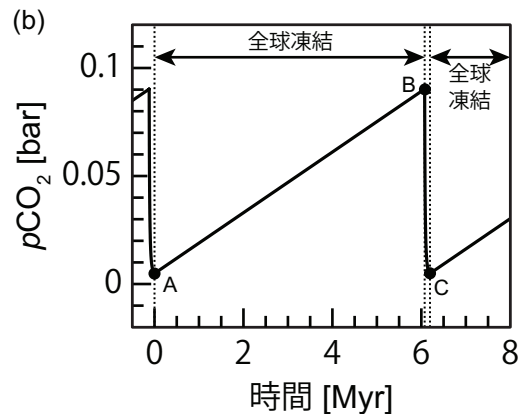
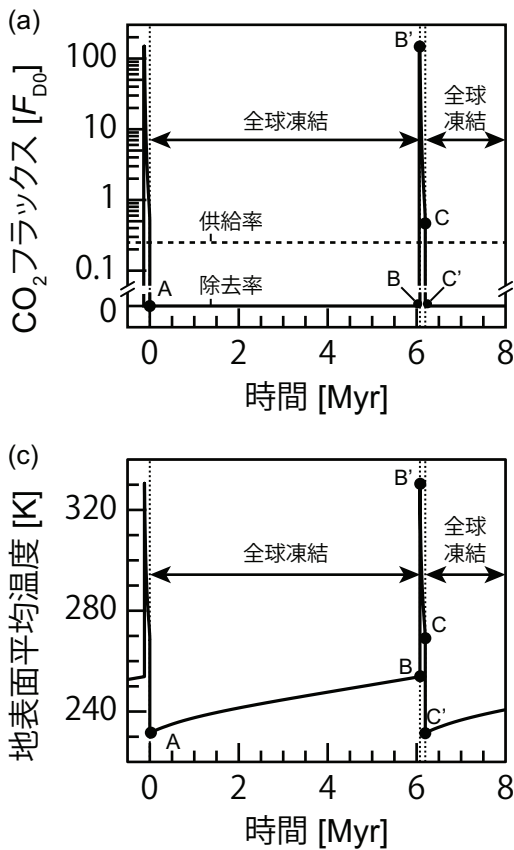


図3：全球凍結サイクルにおける，(a)ケイ酸塩風化によるCO₂除去率(実線)と火山活動によるCO₂の供給率(破線)，(b)大気中CO₂分圧(pCO₂)，および(c)地表面平均温度の変化. 日射量は0.9 S₀. 脱ガスによるCO₂の供給率は現在の地球の25%を仮定した. 全球凍結中はケイ酸塩風化が停止しCO₂の除去率が0になる一方，火山活動に伴うCO₂の脱ガスは継続するため(図a中の点Aから点B)，pCO₂および地表面温度が増加する(図b, c中の点Aから点B). 地表面温度の上昇によって全球に広がった氷床が融解を始めると，氷アルベドフィードバックにより地表面温度は一気に上昇する(i.e., 気候ジャンプ; 図c中の点Bから点B'). 地表面に液体の水が露出している間は，ケイ酸塩風化によるCO₂の除去が火山活動によるCO₂の供給を卓越するため(図a中の点B'から点C)，pCO₂および地表面温度は急激に減少する(b, c中の点B'から点C). この地表面温度の減少に伴い氷床が拡大していくと，最終的にまた氷アルベドフィードバックにより，全球凍結状態へ戻る(図c中の点Cから点C').

島弧火山の噴火を通じて大気中へと再放出される. こうした一連のプロセスのうち，火山活動は地表面温度に対して不変である一方，化学反応であるケイ酸塩の風化は強い地表面温度依存性を持つ. このように大気中CO₂の供給・除去プロセスの地表面温度依存性の違いがあるため，炭素循環はウォーカーフィードバックと呼ばれる負のフィードバックを持つ[7]. たとえば，平衡状態から地表面温度が低下した場合，ケイ酸塩風化に伴う大気からのCO₂の除去速度は低下する. 一方，火山活動による大気へのCO₂の供給速度は一定である. CO₂の供給が除去に卓越することで，pCO₂は増加し，温室効果が強化され，地表面温度は平衡状態へと収束する. また，ケイ酸塩風化には液体の水が関与することから，全球凍結状態ではケイ酸塩風化が停止すると考えられる. 一方，火山活動は全球凍結状態でも続くため，結果的に大気中にCO₂が蓄積し，全球凍結状態から脱出することができる[e.g., 8]. 地球史を通じて，

温暖な環境が維持されてきたことや，また少なくとも3度あった全球凍結イベントにおいて全球凍結状態から脱出できたことには，炭素循環のウォーカーフィードバックが重要であったと考えられている.

従来の研究では，炭素循環とその負のフィードバックを仮定することで，ハビタブルゾーン内の惑星は温暖に保たれると考えられていた[e.g., 1]. しかし，近年の研究により，炭素循環を持つ，惑星を温暖に保つメカニズムにも限界があることが指摘されるようになった[e.g., 9]. 炭素循環を仮定した場合，pCO₂はCO₂の供給率に応じて変化する. つまりCO₂の供給率が小さければ，pCO₂も小さく，相対的に惑星も寒冷化する. ここでCO₂の供給率が小さく(i.e., pCO₂が小さい)，惑星を覆う氷床が低緯度まで発達し，氷アルベドフィードバックによって惑星が全球凍結状態へ遷移する(気候ジャンプする)状況を仮定する. 全球凍結状態に遷移する時間スケール(100~1000年)はウォーカーフィ

ードバックによる $p\text{CO}_2$ 調節の時間スケール(〜10万年)に比べ短いため、ウォーカーフィードバックではこの気候ジャンプを止めることができない。全球凍結状態中はケイ酸塩風化が停止するため大気中に CO_2 が蓄積し(図3中の点Aから点B)、いずれ全球凍結状態から脱出する(図3中の点Bから点B')。しかし、温暖な環境下では低い CO_2 の供給率に対し、 CO_2 の除去率が卓越しているため、惑星は再度寒冷化し(図3中の点B'から点C)、全球凍結状態へと気候ジャンプする(図3中の点Cから点C')。このように、 CO_2 の供給率が小さい場合には、惑星は温暖な気候を維持することができず、全球凍結状態と温暖な気候状態の間を振動するリミットサイクル(全球凍結サイクル状態)に陥る。温暖な気候を維持できる CO_2 の供給率の閾値は、恒星放射や大陸分布、海陸比などの条件によって変化するが、例えば現在の地球を想定すると、現在の地球の CO_2 の供給率の1/10程度であると考えられている[e.g., 9]。

このように、炭素循環が機能していても惑星が温暖であるとは限らない。しかし、そもそも“全球凍結状態にある惑星がハビタブルでないか”に関しては議論が残る。全球凍結状態にある惑星も、惑星内部からの熱により数十億年にわたって、氷床下部に内部海を維持していると予想される[10]。地球史の全球凍結イベントでも生き物が生きながらえていることを考えると、このような内部海に生き物が存在することは否定できない。また、このような全球凍結中の内部海で生存していた生き物は、全球凍結サイクル中の温暖な気候である期間には惑星表面に露出しているかもしれない。ただし、全球凍結サイクルにおいて、温暖な気候状態にある期間は全球凍結状態にある期間に比べ、典型的には1/10〜1/100程度と短い。したがって、仮に全球凍結サイクル状態にある惑星を観測したとしても、実際に観測できるのは全球凍結状態にある惑星であろう。

3.3 二酸化炭素以外の温室効果

ここまで、 CO_2 の温室効果に基づいてハビタブルゾーンの外側境界の議論を行ってきた。これは、地球をはじめとする地球型惑星において CO_2 が大気中の主要成分であることに基づく。しかし、例えば初期地球で想定されるような還元的な大気環境下では、現在のタitanのようにメタンも大気の主成分の一つであり、

メタンの温室効果で惑星表面が温暖に保たれることも想定される。こうした CO_2 以外の気体の温室効果は、地球史における暗い太陽のパラドックスの観点から議論がなされてきている。しかし、ハビタブルゾーンの境界に対する影響はまだ明らかでない。

地球(型惑星)と異なる大気という観点からは、高い大気圧がハビタブルゾーンの外側境界に与える影響が議論されている。例えば、窒素が大気中に現在の10倍ある場合、その高い大気圧によって H_2O や CO_2 の吸収線が広がり、これらの気体を持つ温室効果が強くなるため、ハビタブルゾーンの外側境界は $0.01 S_0$ 小さくなると予測されている[1]。また、より顕著な例として水素大気を持つ温室効果に基づく議論がある[11]。水素は、二原子分子であり吸収は弱い、高圧環境下では衝突誘起吸収を起こす。仮に水素が10 barあるとすると、恒星放射が $0.01 S_0$ でも惑星表面は温暖に保たれる[11]。

3.4 二酸化炭素大気の崩壊とその影響

ハビタブルゾーンの外側境界に関し、 CO_2 雲が大きな不確定性の要因となっていることは既に述べた[e.g., 1, 4]。こうした大気層における CO_2 の凝縮に加え、地表面における CO_2 の凝固(i.e., CO_2 氷床の形成)も、ハビタブルゾーンの外側境界に影響を与える可能性がある[e.g., 12]。何故ならば、特に CO_2 が昇華するような低 CO_2 分圧環境下($p\text{CO}_2 < 5.2$ bar)において、地表面温度が CO_2 の凝固点を下回ると、 CO_2 氷床の形成によって $p\text{CO}_2$ (i.e., 大気中の CO_2 分圧)が低下する(大気崩壊が起こる)からである。このような環境では、例えば火山活動によって CO_2 が大気に供給されたとしても、その CO_2 は速やかに凝固してしまうため、 $p\text{CO}_2$ が増加することが困難になる[e.g., 12]。(ただし、 $p\text{CO}_2$ 増加による温室効果の強化によって、 CO_2 氷床が暴走的に融解する可能性もあることに注意。)

CO_2 の凝固点は低く($p\text{CO}_2 = 2$ barで〜200 K)、また $p\text{CO}_2$ が高ければ大気による顕熱輸送の効率もよくなる(i.e., 赤道-極間の温度差が小さくなる)ため、温暖な環境下における CO_2 氷床の形成は考えにくい。一方、全球凍結状態にある惑星では CO_2 氷床の形成が予想されている[e.g., 12]。水の氷床と CO_2 の氷床が共存している状態では、両者の密度の差によって CO_2 氷床は速やかに($< 10^4$ 年)水の氷床の下部に潜り込み、大

気とCO₂氷床が遮断されてしまう[e.g., 12]. このため、CO₂の暴走的な融解も起こりづらくなる. このような点を考慮すると、惑星が全球凍結状態を脱出するためには、0.67 S₀以上の恒星放射が必要であると予想されている[e.g., 12]. 前述の通り、ハビタブルゾーン内の惑星がCO₂脱ガス率の低下によって全球凍結状態に陥る可能性は十分考えられる. また、中心星進化に伴うハビタブルゾーンの移動により、進化過程でハビタブルゾーンに入った惑星は、初期状態が全球凍結状態である. こうした惑星が温暖な状態に遷移するためには、従来のハビタブルゾーンの外側境界(0.34 S₀)よりも高い恒星放射が必要である. つまり、ハビタブルゾーンの実効的な外側境界は、従来考えられていたよりも厳しい条件なのかもしれない. ただし、CO₂氷床が形成されるかどうかは南北方向の熱輸送効率や自転軸傾斜に強く依存している. 例えば、この熱輸送効率が高い(e.g., 背景大気圧が大きく顕熱輸送効率が良い)場合には、同じ恒星放射・pCO₂条件でも極域の温度が高くなるため、CO₂氷床が形成されにくくなる. このため、上記のような条件によって、この境界(0.67 S₀)も変化することに注意しなくてはならない.

3.5 ハビタブルゾーンの移動と進化

恒星は主系列の間、年齢に伴いその光度を増大させる. その光度増大に伴いハビタブルゾーンの内側境界は外側に移動すると考えられている[e.g., 1]. つまり、ハビタブルゾーン内に位置している液体の水を表面に持つ惑星は、前述したように湿潤温室状態になり、その後暴走温室状態に陥ってしまう. しかしながら、気候の進化を考慮した場合、惑星の水量によってはハビタブルな環境を維持する可能性がある.

中心星の進化(光度進化・極紫外線進化)と水の損失を考慮し、鉛直一次元放射対流平衡モデルを用いて大気中と表面の水量を見積り、惑星の気候の進化を検討した結果、比較的少ない水量(地球海洋水量の約10%)を保持している惑星は水の散逸により海惑星気候から陸惑星気候へ進化することでハビタブルな期間を延ばす可能性があることがわかっている(図4). 一方で、それより多くの水を保持している惑星は大規模な水の散逸を経験したとしても、暴走温室状態に陥ってしまう. 大規模な水の散逸は、惑星のハビタビリティを壊すものであると考えられてきたが、気候の進化を

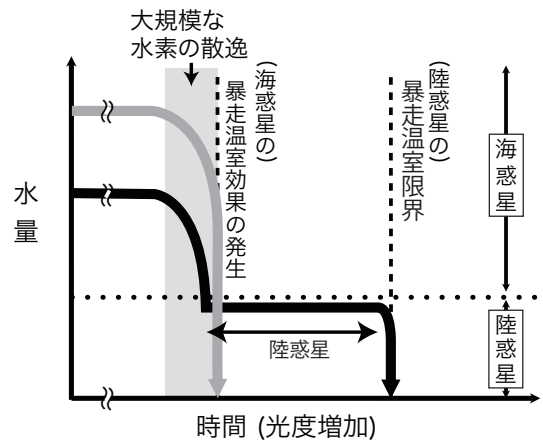


図4：海惑星から陸惑星への進化の概念図. 初期水量が大きい場合、暴走温室効果の発生までに十分な水量を減らすことができないため、海惑星は陸惑星に進化することができない. 一方、初期水量が少ない場合は、十分に水量を減らすことができるため、海惑星から陸惑星へ進化することができる.

駆動し、ハビタブルな期間を延ばすものである可能性があることが示されている[13].

ハビタブルゾーンの外側境界も、内側境界と同様に、中心星の光度増大によって外側に移動しすると考えられてきた[e.g., 1]. しかし、全球凍結惑星がハビタブルゾーン外側境界に相当する恒星放射を受けたとしても、ハビタブルな状態に遷移できるわけではないことを考慮すると、中心星光度増大がそのまま外側境界の移動につながるわけではないかもしれない. このような場合の極端な例として、全球凍結から温暖な気候への気候ジャンプがおきないと仮定し、外側境界は形成直後の位置から移動しない(i.e., 内側境界の進化に伴いハビタブルゾーンが時間と共に狭くなる)という進化パターンも提案されている[e.g., 1]. より現実的には、炭素循環の負のフィードバックやCO₂氷床の形成など、気候ジャンプを起こす・妨げる要因を考慮した検討が必要である.

4. 系外ハビタブル惑星の現状の理解

ここまでは、惑星のハビタブルな気候の境界についてレビューしてきた. 本章では、現在検出されている惑星がハビタブル気候を持つ可能性について議論する.

4.1 TRAPPIST-1系の惑星

TRAPPIST-1系は、ハビタブル惑星を保持していると考えられる、最も注目されている系である。TRAPPIST-1は、有効温度が2550 Kで質量が太陽質量の0.09倍の恒星であり、7つの惑星を持つことがわかっている。これら惑星の半径は地球半径の約0.72倍から約1.13倍である。

このような低質量の恒星の進化は太陽型星と大きく異なり、前主系列段階における強烈な光度と紫外線強度という特徴を持つ。こうした強烈な光度と紫外線強度のため、この惑星系の7つの惑星は初期に暴走温室状態にあり、形成後の数百万年間で数地球海洋水量を失ったと考えられる。こうした水の散逸により、残留酸素が大気中に蓄積していると予想される。

TTVs(Transit-timing variations)観測による惑星のバルク密度の推定から、これらの惑星は地球型惑星か揮発性物質に富んだ組成であることが示唆されている。一方、TRAPPIST-1系の惑星の軌道が軌道共鳴に近いという事実を考えると、親星から遠い場所で形成され、その後、現在の位置に移動してきたのだろう。

つまり、惑星はスノーラインを越えた場所で形成され、初期の大規模な大気散逸を経験してもなお、揮発性物質に富んだ惑星の組成を我々に示しているということになる。

以下では、それぞれの惑星に対し、ハビタブルな環境を維持する条件について検討した結果を紹介する[14]。まず、TRAPPIST-1bとcは、惑星が受け取る恒星放射が大きいため、全球的に繋がった海洋を維持することはないと考えられる。

一方、TRAPPIST-1 f, g, hは、これらの惑星が受ける恒星放射が弱いため、ハビタブルな環境を維持するためには、温室効果気体の存在が海洋の保持に欠かせない。TRAPPIST-1 fとgは火星よりわずかに大きいため、数気圧の二酸化炭素大気を保持することが可能である。これらの惑星が仮にハビタブルな環境を維持しているとすれば、初期火星のような気候であると想像される。

TRAPPIST-1 hの夜面では、CO₂の凝結が起こる可能性がある。この惑星は質量も小さく低温なことから、ハビタブルな環境を作るのは難しそうである。しかし、実際に凝結が起きるかどうかにについては、昼面で受け

取ったエネルギーの再分配が関係しており、今後の詳細な検討が待たれる。

TRAPPIST-1系でハビタブルな環境を保つことに適している惑星(ハビタブルな環境を形成するために条件が少ない惑星)は、TRAPPIST-1 dとeである。TRAPPIST-1 dは同期回転惑星のハビタブルゾーンの内側境界付近に位置している。このため、アルベドが高く、厚い雲を恒星直下点に持っているような場合や、水の分布によっては、惑星表面に海洋を持つ可能性がある。TRAPPIST-1 eは、水蒸気以外の温室効果気体を必要とせずに液体の水を惑星表面に維持することができるかと推定されている。このため、成層圏メタンの吸収や光化学により作られるヘイズによる高い惑星アルベドのような反温室効果がなければ、表面に液体の水を維持できると考えられている。

4.2 Proxima Centauri b

Proxima Centauriは、太陽に最も近い恒星であり、ハビタブルゾーン内に惑星(Proxima Centauri b)を保持していることが知られている。

Proxima Centauri bの軌道が円軌道だと仮定した場合、惑星は潮汐固定されている可能性がある。しかし、Proxima Centauri系は若く、公転軌道が円になるには不十分であることを考えると、3:2のspin-orbit resonanceになっている可能性もある。今後の観測では、Proxima Centauri bの場合は大気組成と水量に加え自転周期も重要になる。

Proxima Centauri bが同期回転していた場合、背景大気に1気圧のN₂を仮定すると、表面に存在する水量が地球の海洋水量の60%よりも多ければ、液体の水が恒星直下点に存在することが示されている[15]。また、1気圧の二酸化炭素が大気中に存在している場合は、夜面であっても液体の水を保持できると考えられる。一方、水量がそれよりも少ない場合、夜面への水輸送により夜面で氷として蓄積することが予想される。この場合には、惑星表面での液体の水の存在は、昼-夜面境界付近での氷床の流動により決まる。しかし、この点に関し、詳細な検討はされていない。

一方、同期回転していない場合は、約10 m barの二酸化炭素かつ1 barのN₂があれば、全球凍結状態に陥ることはないと推定される。

5. まとめと将来課題

系外惑星科学の1つのゴールは、系外惑星におけるハビタブル惑星や生命の検出である。慣例的に、ハビタブル惑星は、ハビタブルゾーンという概念を用いて検討されてきた。ハビタブルゾーンは、惑星表面に液体の水が安定に維持することのできる中心星からの距離の範囲である。ハビタブルゾーンの内側境界は、暴走温室効果と湿潤温室効果の発生で決まっている。一方、外側境界は、二酸化炭素の温室効果の限界で決まっている。しかしながら、この検討には、暗に『常に表面が湿潤な惑星』という仮定がある。地球に比べ少ない水量を保持する惑星の場合、乾燥領域から強い惑星を射出できるため、海惑星に比べ大きな暴走温室限界をとることができる。また、炭素循環とその負のフィードバックは惑星の気候を温暖に保つ機能を果たしている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わかってきた。よって、単にハビタブルゾーンに位置している惑星であってもハビタブルな環境かどうかはわからなくなってきている。加えて、大気組成の不確実性も考慮すると、まだ我々のハビタブル惑星の理解は水を保持する惑星の多様性を十分包括するほど、進んでいないことがわかる。系外惑星の検出数の増大に伴い、潜在的にハビタブル惑星と考えられる天体の検出が増大してきている。このため、“地球のような惑星”を検出する日は、刻々と近づいていることは確かである。しかしながら、地球と似て非なる物理プロセスにより気候が決まっているその“地球のような惑星”を十分に理解するには、まだまだ検討すべき課題が多く残っている。具体的には、大気組成の進化を考慮する場合に挙げられるような、惑星内部の進化(熱史)や大気散逸を伴う大気進化である。また、数値計算の問題から系統的な検討がされていないため、気候レジームがどう決まっているかは明らかでない。ハビタブル惑星の気候の形成を明らかにすることが、ハビタブル惑星の検出に重要なステップになるだろう。

謝辞

本稿の執筆機会をいただき、また本稿に対し有益なコメントをいただいたことを、成田憲保博士に感謝い

たします。ハビタブル惑星とは、地球型惑星が持つ特徴の1つであるため、これまで私たちは多くの人と議論を交わし、アドバイスをいただきしてきました。我々にハビタブル惑星とは何か? 地球とは何か? という疑問を常に投げかけてくれた阿部豊先生に感謝いたします。まだ我々はその十分な答えを持っていませんが、これからも近づけるように研究していこうと思います。

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., *J. Atmos. Sci.* 49, 2256.
- [4] Mischna, M. A. et al., 2000, *Icarus* 145, 546.
- [5] Abe, Y. et al., 2011, *Astrobiology* 11, 443.
- [6] Kodama, T. et al., 2018, *JGR:planets* 123, 559.
- [7] Walker, J. C. G. et al., 1981, *JGR* 86, 9776.
- [8] Kirschvink, J. L., 1992, in *The Proterozoic Biosphere*, 57.
- [9] Kadoya, S. and Tajika, E., 2014, *ApJ* 790, 107.
- [10] Tajika, E., 2008, *ApJL* 680, L53.
- [11] Pierrehumbert, R. and Gaidos, E., 2011, *ApJL* 734, L12.
- [12] Turbet, M. et al., 2017, *EPSL* 476, 11.
- [13] Kodama, T. et al., 2015, *ApJ* 812, 165.
- [14] Turbet, M. et al., 2018, *A&A*, accepted, DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731620>
- [15] Turbet, M. et al., 2016, *A&A* 596, A112.