

1.生存可能条件

Habitable Planet の形成と進化

阿部豊

東大・理・地球惑星科学専攻

講義予定

1. 生存可能条件
 2. 短期的生存可能条件
 3. 連続的生存可能条件
 4. 水の供給：地球大気形成論
 5. 地球・金星・火星
 6. 惑星気候学
 7. 生存可能惑星の形成
- 1～3. 教科書的 (学部生レベル)
5～7. だんだんあやしい話になってくるらしい

太陽系外の惑星系

太陽系外の惑星

158系 194個 (2006.6.26)

Habitable Condition vs Continuously Habitable Condition

Habitable Condition: ある一瞬に惑星上で生命が生きられる条件
「人間にとって適当」とする定義もある

短期的生命生存可能条件

Continuously habitable Condition: ある程度長期間にわたって惑星上に生命が
生きられる条件 (期間は10億年とか45億年とか勝手に与える)

連続的的生命生存可能条件

Habitable Condition

まずは条件を決めなければならないが、、、

本当の条件ははっきりしない

何を持って「生き物」と呼ぶか？そもそも「生き物」とは何か？

・・・我々は地球型生命しか知らない！

→なにをもって生き物とするか？

→宇宙型生命といった場合、地球型生命を生命としてよいのか？

→地球型生命しか知らないので、ここでは地球型生命だけを考える

→地球型生命以外を”想像”可能かもしれないが、現時点では意味ないだろう

(地球型生命に注目)

液体の水が地球型生命の生存・繁殖にとって必須

→ 液体の水の存在を条件とする

Habitable Condition

液体の水の存在を条件とする

← 地球型生命の生存・繁殖にとって必須

液体の水が存在できる条件

その軌道半径の幅=Habitable Zone

H2O の普遍性

太陽組成と炭素質隕石の組成のアバンドランスの図

太陽組成：H, He, O, C, Ne, N...

H₂O は大量に存在→重要

→Solar abundance、C1 組成を見ると、H、O は宇宙空間で普遍的に存在する

H2O の特殊性

分子量と融点・沸点の関係図

分子量大→融点・沸点高

分子量 vs 液体でいられる温度@ 1 気圧→H₂O は高い温度を持っている

温度が高い状態で液体でいられる物質は、良い物質である

高い温度→反応速度が速い

水は特殊：分子量が小さいにもかかわらず融点・沸点が高い (重要！)

化学反応で生きている生き物

エネルギーと物質の出入り

溶液の中では化学反応にとって好条件

そこそこ高濃度

動きやすい

水は高温 (化学反応が起きやすい) で液体なので、化学反応にとって非常に好条件

高分子だと材料がたくさん必要、水はわずか3分子でOK

→ 水は媒体としては非常に理想的！

これ以降、生命うんぬんではなく、とにかく「水」の存在可能性を議論

これから以降は”生物”ではなくて”水”について議論していく

生命誕生にはなんらかの不均質性が重要

→なんらかのエネルギーによって不均質性ができる

→エネルギーソースとして何を考えるのか？

→不均質性が重要。熱水系でも不均質性ができる。

→太陽が当たっているという状況を考える（エウロパのような状況は考えない）

→表層環境を考える

***寄り道**

惑星の内部からのエネルギーを使って生きている生命もいる（エウロパ？）

→ 考えない。考えていたらきりが無い。そもそもよく分からない。

外部からのエネルギー（太陽エネルギー）を使って生きている生命を考える、つまりオープンスペース環境下での生命のみを議論する

結局、人間を中心とする地球型生命のみを議論の対象とする

***寄り道2**

最初の生命は太陽エネルギーが必要？

熱水噴出口などで生命誕生なら必要ない？

→ しかし結局は何らかのエネルギーソースによる勾配が必要（これは太陽でも惑星内部でもよいはず）

→ でも内部を考えるとやってらんないので、とにかく惑星表層を

水をもつ惑星形成の3条件

1. H₂O が惑星に供給される

H₂O または水素と酸素が供給される

2. H₂O が惑星表面に存在する

惑星内部に閉じこめられたり、
宇宙空間に散逸しない

3. H₂O が液体になる

凍りついたり、全て蒸発したりしない

3 → 2 → 1 の順でわからなさが増すので、この順で講義

Habitable Zone

Zone の内側限界：H₂O の散逸

≡暴走限界

Zone の外側限界：CO₂ の凝縮

テクトニックな活動が活発で大きな脱ガスが維持される場合
現在の太陽系：0.95–1.37AU

46 億年間：0.95-1.15AU

Kasting, J.F., D. P. Whitmire, and R. T. Reynolds: Habitable zones around main sequence stars, *Icarus*, 101,108-128, 1993.

2. 短期的生存可能条件

Habitable Condition

水をもつ惑星が形成される 3 条件

1. H₂O が惑星に供給される
H₂O または水素と酸素が供給される
2. H₂O が惑星表面に存在する
惑星内部に閉じこめられたり、
宇宙空間に散逸しない
3. H₂O が液体になる
凍りついたり、全て蒸発したりしない

液体の水が存在できる条件

水の相図より液体でいられる範囲

温度条件：0.1~374.11°C（3 重点~臨界点）

高温付近では生命の発生にとっては有利だが、長期的存在は難しい？

圧力条件：>与えられた温度の飽和蒸気圧

2.1 惑星表層環境

0 次元 (全球年平均的) 議論

圧力：静水圧平衡 エネルギーで決まる

温度：熱収支 水の量で決まる

2.1.1 静水圧平衡

圧力は大気量で決まる (式)

静水圧平衡の式より

惑星表面の圧力は大気圧で決まる

惑星熱収支概念図

2.1.2 熱収支

太陽放射による加熱

惑星放射による冷却

平均的に両者がバランス = 放射平衡

現実には対流の効果もあるが、対流や熱伝導では宇宙空間でエネルギーを運べないから、もっとも基本的な近似は放射平衡

プランク関数 Planck function

理想的な放射の関数

単位波長当たり・単位振動数あたり・単位波数あたりの 3 通りで書ける

3 通りそれぞれ単位が違うので、単に変換するだけでは異なる

→ $d\lambda$ などとして積分した量が同じになるように変換すればよい

Wien の遷移則

温度によって、波長のピーク位置と波長限界がずれる、また高温ほど全体のフラックスが大きくなる

波長積分した全フラックス

温度の 4 乗に比例する $F = \sigma T^4$

太陽放射と地球放射

太陽： $T=6000\text{K}$ peak=0.483 μm (0.18-8.3 μm に 99.8%) : 短波放射

地球： $T=300\text{K}$ peak=0.7 μm (3.7-167 μm に 99.8%) : 長波放射

紫 0.38–0.43 μm

緑 0.49–0.55 μm

赤 0.64–0.77 μm

中心星と惑星の放射の波長域はかなり異なる

2.1.3 放射平衡と温室効果

放射平衡 Radiative Equilibrium

放射のみでエネルギー収支が釣り合う

$$\pi r^2 S(1-A) = 4\pi r^2 F$$

$$S(1-A)/4 = F_s = F$$

太陽放射：可視光で入射するので透明 → $F_s = \text{const.}$

惑星放射：赤外光なので不透明

惑星が十分早く自転している場合なりたつ。大気を持っている惑星はだいたいこれでよい。

ガラス板モデル

大気をガラス板と真空に分割

ガラス板：惑星放射に対しては不透明

太陽放射に対しては透明

大気なし

地面は黒体とすると：惑星放射 = 赤外放射は温度の 4 乗に比例

惑星放射と太陽放射の釣り合い

ガラス 1 枚

太陽放射→地面で惑星放射→ガラス板で上下に半分ずつ赤外放射→地面で
また惑星放射→ガラス板で・・・

ガラス1枚 要約

足し合わせると $\sigma T^4 = 2F_s$ となり、地面は太陽放射の2倍の放射が必要、
ガラス板は太陽放射と同じ放射を上下に出す

ガラス2枚 要約

ガラス板が増えると地面の放射が増える

質問：ガラス板の枚数は何に対応しているのか？

答え：大気の光学的厚さに対応している

$$T_s = \left[\frac{F_s}{\sigma} (n+1) \right]^{1/4} \quad T_s = \left[\frac{F_s}{\sigma} \left(\frac{3}{4}\tau + 1 \right) \right]^{1/4}$$

ガラスn枚

$$\sigma T^4 = (n+1)F_s$$

温室効果 Greenhouse Effect

大気が吸収したエネルギーの一部が地面に向けて放射されるため、その分のエネルギーを地面が多く放射しなければならなくなる

多くの放射を出すために温度が上がる

熱が大気に溜まるためではない (←よくある勘違い)

温度上昇は平衡を維持するための変化

惑星放射の伝達

大気の光学的厚さ≡ガラス板の枚数

放射伝達の式で係数2/3は放射場の天頂角依存性に対する仮定に基づく

質問：いつから平行平面大気の話になったのか？

答え：ガラス板モデルから

質問：球殻の場合は？

答え：球殻の場合は、厳密に解くのが大変。曲率半径の長さでの光学的厚さが1以下だと、斜めから入ってくる光を扱うのが難しい。

惑星放射 Planetary Flux

放射伝達の式を積分するとフラックスが求まる

惑星放射 = 大気の放射 + 地面の放射 - 宇宙からの入射

温度と吸収物質の分布で決まる

光学的厚さで重みを付けたプランク関数の積分
最も $\tau=1$ での温度に敏感

* 寄り道

ここでは全て平行平面を考えているが、球面を考えるのはかなりめんどい。
局所的球面や、表面積の効果のみを考える場合はあるが、斜め入射等を考え出すと、簡単には解けなくなる

惑星放射 Planetary Flux

光学的に薄い大気： $\tau \ll 1$ 第2項 (地面)

大気からの寄与がない

光学的に厚い大気： $\tau \gg 1$ 第1項 (大気)

地面からの寄与がない

$\tau=1$ あたりの温度できまる

灰色近似

光学的性質の波長依存性を無視する

Boundary Conditions

2.1.4 放射対流平衡

放射平衡では地面に温度ギャップが生じる

→ 対流不安定

地面温度がちょっとだけ高い → 下層大気だけ対流

放射対流平衡構造

断熱温度勾配

対流が起こると効率よく熱輸送するが、

対流が起こった方が地面が高温になることがある。(注意を要する)

惑星放射 Planetary Flux

温度と吸収物質の分布で決まる

光学的厚さで重みを付けたプランク関数の積分

最も $\tau=1$ での温度に敏感

乾燥断熱勾配 Dry Adiabatic

対流圏は断熱温度勾配

α : 体積膨張率

理想気体で、 $\alpha = 1/T$

湿潤断熱勾配 Moist adiabat

式がごちゃごちゃ

擬湿潤断熱勾配 moist pseudoadiabat

擬湿潤断熱

水蒸気量が少ないと：乾燥断熱に漸近

水蒸気量が多いと：飽和蒸気圧曲線に漸近

擬：凝結物の存在を考えない、できた凝結物が速やかに取り除かれる

放射平衡大気はいつも対流不安定というわけではない

吸収係数一定の灰色放射平衡大気では温度勾配は乾燥断熱勾配よりも小さいことが普通

$\gamma - 1/\gamma < 1/4$, $\gamma < 4/3$ でないと対流が起こらない。

(普通はこのような比熱比にならない) 2原子分子: 7/5, 単原子: 5/3

地球では乾燥断熱温度勾配より大きくずれているので、対流が起こっている。

ほかの惑星では必ずしも対流しなくてよい。

2.2 Runaway greenhouse

水蒸気は強い温室効果気体

気温が高いほど水蒸気は多い

気温が高いほど大きな温室効果

どこかで温室効果が暴走する？液体の水が存在できなくなる

典型的正のフィードバック過程

射出限界 The critical flux for the runaway greenhouse

海洋を持つ (=大気が wet である) 惑星には、射出できる惑星放射に上限がある：射出限界

射出限界を超える太陽放射が入射すると、どんなに大量の水があっても、全て蒸発するまで、温度上昇する

Komabayashi 1967,1968; Ingersoll 1969, Kasting et al. 1988; Abe & Matsui, 1988; Nakajima et al., 1992

暴走温室効果 Runaway greenhouse

地表温度と惑星放射の関係図

1気圧の Air と CO₂ 大気を考えると、、、

ある地表面温度で惑星放射が頭打ちに (307W) →射出限界

これを超えるエネルギー入射があるとエネルギー収支が合わなくなり、すべての水がなくなるまで温度上昇が続く

CO₂の方が温室効果が強い

Nakajima et al. 1992

Nakajima, S., Y.-Y. Hayashi and Y. Abe: J. Atmos. Sci., 49, 2256–2266, 1992.

凝結成分 (H₂O) 以外の温室効果気体を考えない

放射が一度上がって下がるのは？ (よくある質問)

上の limit は K-I Limit で、下の limit は放射対流平衡の limit で
2つの limit

放射平衡で決まる limit: Komabayashi-Ingersoll limit

放射対流平衡で決まる limit:

Komabayashi-Ingersoll Limit

放射平衡での放射 limit

放射平衡を解析的に解けば求まる

一定値になる理由

地表面の温度が上がると、大気中の水蒸気量が増えるた T-P は水の蒸気圧
曲線に漸近する (T > 450K で顕著)

T- τ も同様にある曲線に漸近する

→ $\tau=1$ 付近の曲線は同じになる、惑星放射は一定になる

放射が上がって下がる理由:

低温だと $\tau < 1$ なので地面が見える、温度上昇とともに σT^4 で上がる (ピークへ)

ピークを過ぎると地面が見えなくなる、対流圏の温度勾配が変化 (乾燥
→ 湿潤へ)

放射は $\tau=1$ 付近の温度勾配で決まるので、ピークを過ぎて温度勾配が小さくなると (湿潤へ向かうと) 放射量が小さくなって、下の limit へ

ともかく、「あがったらさがる」

惑星放射 Planetary Flux

光学的に薄い大気: 第2項

大気からの寄与がない

光学的に厚い大気: 第1項

地面からの寄与がない、 $\tau=1$ あたりの温度できまる

射出限界

水蒸気大気 P T 図

以下、Abe & Matsui

水蒸気大気 Z T 図

暴走が起こると、大気が 300 km を超える。

水蒸気分布

暴走が起こると、大気全域で水蒸気分圧がほとんど 1 になる。

「20 年前のことはよく覚えていない」

フラックス地表温度

温度とフラックス・冷却

2.3 凍結限界

アイスアルベドフィードバックを考慮した単純な全球モデル

アルベドの変化を考慮した放射平衡を解く

$A = 0.3$ ($T_s > 273$)

$A = 0.6$ ($T_s < 273$)

多重平衡

太陽放射を増やす（減らす）と 2 つのブランチが存在する

冷たいブランチから暖かいブランチに移るためには、射出限界を超える入射が必要 → 全球凍結を抜けたとたんに暴走温室（常に液体の水は存在できない）

多重平衡

多重平衡

2.4 水が存在できる条件

Figure 惑星放射 vs 二酸化炭素量

暴走温室・全球凍結・CO₂ の凝結・超臨界流体の条件で決まる

それぞれの境界を決める要因

右：暴走温室効果

左下：全球凍結

左：二酸化炭素自身が液化

上：超臨界流体になる

必要な水の量

水が存在するためには、飽和蒸気圧以上の水が必要。約 0.001 気圧
10 気圧（水深 100 m）の水でもほぼ全領域で水が存在できる。
→あまり大量の水は必要ない

原始地球・金星・火星の比較

昔は、、、

火星：凍結 地球：液体 金星：液体

45 億年前の地球（minimum albedo を仮定），金星は液体の水が存在可、火星は不可。

現在は、、、

火星：地球のみ液体存在可能

Habitable Zone

液体の水が存在できる条件

全球凍結限界 < 正味太陽放射 < 暴走温室限界

全球凍結限界は大気成分やアルベドによって大きく変わる

暴走温室限界はあまり変わらない

正味太陽放射 → 軌道半径（反射率を与える）

軌道半径の幅 = Habitable Zone

3. 連続的生存可能条件

Continuously Habitable Condition

惑星環境の変化要因

1. 太陽放射の増大
中心星の進化にともなう
45億年間に30%明るくなった
2. 大気中の二酸化炭素量の減少
海に二酸化炭素が溶解し、石灰岩として固定される
海があるか無いかで挙動が変わる
3. 水蒸気の散逸
水蒸気は大気上層で分解されて水素として散逸

3.1 大気の保持と散逸

3.1.1 大気の保持

大気を保持する条件

重力エネルギー > 気体熱運動のエネルギー

エスケープパラメータで表現 $\lambda = GMm/RkT$

温度が高いと大気がふくらんで重力圏外に逃げってしまう (ハイドロダイナミックエスケープ)

温度高・惑星小ほど逃げやすい

ポリトロープ Polytrope

$$T = ap^{(\gamma - 1/\gamma)}$$

Polytropic exponent γ で表現

断熱の時は $\gamma =$ 比熱比 等温のときは $\gamma = 1$

注：一見状態方程式のように見えるが、実際には熱輸送に関する仮定

*スライド間違い：Hp の式の右辺の指数が逆

Spherical Polytrope Atmosphere

静水圧平衡から圧力・温度・密度の式
(ある基準点での λ_0 を用いて書ける)

Structure of Polytrope Atmosphere

等温の大気は保持できない

(熱エネルギー一定、重力エネルギー減少なので、どこかで散逸)

Hydrodynamic Escape

If $\lambda_0 < \gamma/\gamma-1 \rightarrow$ ハイドロダイナミックエスケープ
静水圧平衡で無限遠でも圧力 $\neq 0$ なので抑えが効かない
典型的なものは太陽（太陽風）

大気の保持

惑星質量と温度の関係図

温度が $GMm/rkT > \gamma/\gamma-1$ だと大気保持

* 大気のどこかでこの温度 limit を超えると大気は散逸

月以下の質量では大気は保持できない（水は短期的には保持可能；長期的には分解されて H_2 として散逸する）

本当に長時間大気を保持できるのは火星サイズ以上

火星：黒体として 250K 程度だと H_2 は保持可能、熱圏 (~1000K) だとギリギリ、水蒸気は保持可能

* 熱圏では LTE が破れるので温度が上昇（冷却剤としての分子があれば温度は下がる；例えば CO がたくさんあると冷却）

* 成層圏あたりでは H_2O での冷却が効いているが、熱圏では分解されて効かなくなる？

3.1.2 その他の散逸機構

1. Jeans Escape

大気の緩やかな蒸発

2. Nonthermal Escape

微視的加速機構による熱運動からはずれた粒子の散逸

3. Impact erosion

天体衝突に伴う大気のはぎとり

Jeans escape

平衡状態で分布する気体粒子の内、一部は確率的に脱出速度を超えている
そのような粒子が大気上端にあれば、宇宙空間に逃げていく

Maxwell 分布

\rightarrow 上向きに脱出していく粒子の数密度を計算可能

Escape Flux per unit area

* 式間違い； $\cos \theta$ がついたりつかなかったり

Escape flux per unit area

式がたらたらと。。

Exosphere & exobase

一度も衝突せずに宇宙空間に逃げられる領域：外圏 exosphere
その底：exobase

exobase から逃げていくと考える
ここでは等温の exosphere を考える

Escape flux per unit area

エスケープフラックスをエスケープパラメータを用いて表現
最終的にうまく具合に、エスケープパラメータの変化だけでフラックスを見積もることが可能になる！

Exosphere からの散逸タイムスケールはさらに簡単に書ける

* λ が小さいと hidroダイナミックエスケープに接続されるか？

→ つながらない。なぜなら、hidroダイナミックエスケープでは大気が動いていることを考えるが、Jeans エスケープでは大気が動いていないことを仮定するので、接続を考えることはできない

つまり Jeans エスケープを考えるときは λ が大きい場合を考えないとダメ

Maximum flux

Maximum flux at

Jeans Escape Flux and Time

Jeans エスケープのタイムスケールを見てみると、、、

Exobase の酸素分子は抜けない

→ 現在は酸素でフタをしている感じになっている

Exobase の水素・水素分子は散逸

拡散流速でもものが exobase に入れるか？

拡散流速に関してゴリゴリ計算

→ 2種類の気体分子のスケールハイトの差と mole fraction で決まる

最大値を取る場合を計算可能

Escape flux は散逸気体の mole fraction に大きく依存（片割れの気体の種類にはあまりよらない）

Exosphere に拡散でもものが入り（左図）、かつ exobase でのエネルギーが十分にあれば（右図）散逸が可能

非熱的散逸の例

電荷交換・dissociative recombination・衝突解離・光解離・ion-neutral reaction・sputtering/knock-on・solar-wind pickup

- * 酸素や窒素などの、重たい粒子を逃がすことが可能！
(ハイドロダイナミックエスケープの際に H₂ に引きずられて逃げることもあるが、重たい粒子を逃がす重要なメカニズムとしては非熱的散逸！)
- * まだ一般化された研究はあまりない？

Impact Erosion

Impact erosion

1. 衝突速度が十分大きく、衝突によって蒸気雲 (vapor plume) が生成し、蒸気雲が脱出速度を越す速度で膨張する
2. 蒸気雲が大気を吹き飛ばせるほど大きい
スケールハイトより大きいか、小さいかで決まる

Impact Erosion

確かに散逸は起こりうる

従来考えられていたよりもたくさん散逸する

しかし

衝突天体によって持ち込まれる揮発性成分もある

→ 持ち込みの方が多く場合が多い

結果として大気が減るとは結論できない

大気の入替わりはあり得る

(濱野：準備中)

* 集積後期には衝突速度は上がるが、相対サイズが小さくなるので、それによって散逸量が増すかどうかはわからない

* どれぐらいの天体がぶつかれば大気は飛ぶか？

地球だと 10km 程度のインパクトだとあまり飛ばない

数 10km が一番効率よく飛ばせる (100km 超えると供給量の方が多い)

* 結局、すごくドライなものをぶつけないと impact erosion で大気量を減らすのは難しい

3.1.3 水の散逸

いくつかの制限要因

- ・ 上層大気の水の量
- ・ 散逸に使われるエネルギー
- ・ H₂O の解離で生じた酸素の処理

上層大気の水の量

Cold Trap

低温の対流圏界面を超えられない

混合比 10^{-3} 以下では Diffusion Limit で 4 5 億年以内には海洋は失えない

暴走温室状態に近づくと上層大気の水の混合比が急激に上昇する

エネルギー

水素といえども地球の重力で束縛されている＝エネルギーがないと逃げられない

散逸フラックスはエネルギー供給で決まる

* Tian: exobase が水素だらけだと UV をうまく吸収できないので diffusion limit が効かなくなる

地球海洋並みの質量の水

(10-100 倍) 強い紫外線でも 10 億年くらいかかる

酸素の処理

水蒸気が解離しても、酸素があるとすぐ結合

金星のように酸素をなくすためには、、、

生成した酸素の捨て場所？

地面を酸化する？：地面は遠い（火星はこの機構が働いた？）

単純に海（~3km）を考えても、分厚い酸化した層を作る必要有り→難しい

火星の場合はこのメカニズムで海→酸化表面となった？

大気を酸化する？：還元的気体が必要（CO が重要？）

大気中に CO が大量にあれば可能

CO リッチの大気の場合、それが原因で水が不安定になるかも（金星？）

酸素も散逸させる：速い散逸＝大きいエネルギーフラックスが必要

H₂O は分子量 18 だが、H と O に分ければ平均分子量が 6 になって飛ばせるかもしれない？

水の散逸

大気の温度が高い→上層に大量の H₂O

→紫外線による分解→散逸

上層大気の水蒸気量は暴走限界近くで急増

地球太陽放射の 110% 程度では 45 億年間でほぼ海洋質量が失われ得る (Kasting et al 1993)

成層圏の温度をどう仮定するかで成層圏の水蒸気量が違って、散逸フラックスが変わる（阿部先生は 150K、Kasting は 200K）

質問：成層圏の温度を仮定した場合、太陽からの距離で上層大気の水蒸気の混合比が変わるのはなぜか？

3.2 中心星の進化

Luminosity の増大

Increase of solar radiation with solar evolution

太陽放射は増大 (70% → 100%)

エネルギーを失うことによって中心部の温度が上がり熱核反応の速度が上がるため

例の図で横に動く

地球：海が存在できる領域にとどまる

金星：暴走温室状態になり海は蒸発

火星：温暖になり海が存在できるようになる

Virial Theorem

Virial Theorem

‘Negative specific heat’

太陽放射の増大の効果

3.3 二酸化炭素の固定

二酸化炭素量固定の効果

・水循環がないと固定の効率が下がる

地球も火星もいずれ凍り付いてしまう可能性

Carbon Cycle

地球ではプレートテクトニクスで CO₂ 量を調節

変遷モデル：標準

沈み込んだ CO₂ の 1/3 が火山から出てくると仮定している

炭素循環ダイアグラム

Atmospheric CO₂ concentration

Carbonate formation

CaO → Ca²⁺ の反応がサイクルの中で最も遅いので、この反応がサイクルを律則する重要な反応

Carbonate formation (サブシステム間の概念図)

(反応式)

・ Chemical erosion (風化) : 10 ~ 100 万年のタイムスケールで Ca⁺ が供給される

・ 海中での固定の反応は速い

・ 風化がないと、海中で固定された CaCO₃ が分解されて、CO₂ が再度放出

* chemical erosion を無視したサイクルを回すと、逆に CO₂ が release される

Atmospheric carbon concentration

Carbonate formation rate is strong increasing function of

Strong negative feedback process

Balance

If \ll time scale of external change
(e.g. Solar flux or Degassing rate),
is determined by equilibrium

変遷モデル：標準

Note!

CO₂ concentration varies with time so as to keep balance between degassing and carbonate formation.

Change is not the result of imbalance.

Imbalance results in the variation with the time scale of

Regulation mechanism does not operate efficiently for shorter external variation such as the anthropogenic processes

Carbonate formation

Importance of time scale

Time scale of external variation

\gg : regulated by carbon cycle

\ll : carbon cycle cannot regulate

Time scale of carbonate formation

~ chemical erosion: CO₂ sink

< chemical erosion: CO₂ source

変遷モデル：大陸なし

・地表面温度が高温を維持する。固定された CO₂ が再び火山から放出される

変遷モデル：大陸遅れ

・数千万年で平衡になる←テクトニクスのタイムスケール

大陸の影響

安定化には惑星内部の活動が重要

惑星内部から出てくる二酸化炭素量が重要

海で石灰岩として固定される二酸化炭素量と等しくなるような温度を維持

活発なプレート運動で二酸化炭素が出てくることで、地球は凍結を免れている

Continuously Habitable Zone

Zone の内側限界：H₂O の散逸

≡暴走限界（厳密には上層大気の水蒸気の混合比が 10^{-3} 以下）

Zone の外側限界：CO₂ の凝縮

テクトニックな活動が活発で大きな脱ガスが維持される場合

テクトニックがアクティブでないと外側境界が内側にくる

現在の太陽系：0.95–1.37AU

46 億年間：0.95-1.15AU

(Kasting et al: Habitable zones around main sequence stars, Icarus, 101,108-128, 1993.)

4. H₂O の供給 地球大気形成論

水惑星形成の 3 条件

1. H₂O または水素と酸素が供給される
2. H₂O が惑星表面に存在する
惑星内部に閉じこめられたり、
宇宙空間に散逸しない
3. H₂O が液体になる
凍りついたり、全て蒸発したりしない

太陽系の元素組成 (図)

太陽と惑星 (隕石) は同じものからできている。ただし揮発性の物質は異なる。

隕石中の水素は酸素と結びついて含水鉱物として入っている。

Fe, Mg, Si で地球質量の 90%、Ca, Al, Na, Ni も入れると 99%

Molecular cloud

Disk formation

平衡凝縮論

Planetesimal formation

標準モデル

Snow line ~ 2.7 AU

岩石 < 2.7 AU

岩石 + H₂O > 2.7 AU 約 7 割が H₂O

Planetesimal accretion

Planetesimal accretion

Protoplanet formation

火星 (6x10²³kg=地球の 1/10) 位

100 万年くらい

太陽系には太陽組成 = 水素とヘリウム主体の気体が充満

Growth of icy core

Collapse of Jovian atmosphere

等温捕獲大気の崩壊

Collapse of isothermal captured atmosphere

Hydrostatic equilibrium

Dissipation of gas disk

円盤ガスの散逸 $\sim 10^7$ year

Giant impact

地球形成過程の概観 1

原始太陽系円盤ができる

原始太陽系円盤の中で微惑星ができる ($\sim 10^{15}$ kg)

微惑星の衝突合体で火星 (6×10^{23} kg=地球の 1/10) 位の原始惑星ができる

100 万年くらい

太陽系には太陽組成=水素とヘリウム主体の気体が充満

地球形成過程の概観 2

原始惑星同士の衝突 (ジャイアントインパクト) で地球形成

数千万年 \sim 1 億年

月もできる

地球化学的な元素の分類

Lithophile 親石元素

silicate phase に入る

Siderophile 親鉄元素

metal phase に入る

Chalcophile 親銅元素

sulfide phase に入る

Atmophile 親気元素

gas phase に入る

隕石の分類

鉱物と赤外線反射率

揮発性物質の地球への供給

2通りの可能性

1. 最初から気体で供給: 太陽系に充満していた太陽組成の気体 (=水素とヘリウムに富む) の取り込み

2. 固体物質として供給: 微惑星中の揮発性成分の取り込み

どちらか?: 現在の大气から考えてみる

惑星大气: 組成 Planetary Atmospheres: Composition

惑星大气: 組成 Planetary Atmospheres: Composition

希ガス存在量からの制約

地球型惑星の大気の形成：希ガスからの制約

太陽組成に比べ希ガスが極端に少ない
太陽組成の気体を取り込んだ場合
希ガスだけ減らさねばならない
しかし、これは困難
微惑星から供給されたと考えられる

ではいつ供給されたのか？

惑星形成と同時？
惑星形成がほとんど終わってから？
この点については決着は付いていない
しかし惑星形成と同時に供給されたと考える方が自然

水の彗星供給説

欧米で支持者が多い

1. 地球軌道付近は元々高温で乾燥していた
2. ジャイアントインパクトで大気は失われる
3. 水は比較的少量

1. 地球軌道付近は高温ではなかったらしい
2. ジャイアントインパクトでは大気は飛ばない
3. 彗星の D/H 比は海の 3 倍、下げることが困難

彗星起源説の困難

巨大衝突の影響：衝撃波 1 Genda and Abe, 2003

巨大衝突の衝撃波では大気を全てはぎ取れない
地面が地球の脱出速度で動かないと大気は飛ばない
元々原始惑星（惑星の 1/10 の質量）が持っていた大気の 3 倍程度の大気が残る。

巨大衝突の影響：衝撃波 2 Genda and Abe, 2005

地面に海がある場合とない場合で異なる：海があると大気が多く失われる
→水の濃縮
地球が地球型惑星の中で相対的に水が多いのは、水の濃縮の結果かも？
金星大気と地球大気の差？（金星軌道付近では海がなかったとしたら）
大気が大量に失われるので、大気組成が変化することがありうる
*少なくとも水はなかなか失われない

巨大衝突の影響：加熱玄田・阿部, 2004; Genda, 学位論文

大気が高温になることによる熱散逸の可能性

水素自体は散逸可能な温度になるが、ケイ酸塩ガスや他のガスの効果で逃げられない

4000 K 以上では、ケイ酸塩ガスの影響で平均分子量が増えて逃げにくくなる、高温になればなるほど散逸しなくなる

散逸がもっとも速いとき (4000 K) でも、現在の海の水素を逃がすのに 1000 万年かかる。

* 結論：Giant Impact でそれまでの大気を全て逃がすことは難しい

衝突現象

Simple Crater & Complex Crater Crater Transition

天体衝突で何が起こるか

高温高圧の発生

岩石の加熱

→ガス成分の放出=衝突脱ガス

→岩石の融解

→岩石の蒸発

衝突 → 圧縮段階 → 掘削段階 → クレーター形成
(高温・高圧) (リリース)

秒速 2km (月程度) の衝突で脱ガス

秒速 5km (火星程度) の衝突で融解

秒速 10km (地球程度) の衝突で蒸発

まず、圧縮段階で高温高圧が実現。

高温高圧のリリースによって放出される。(掘削段階)

低速の衝突でも、地球のコアマントルに相当する以上の高圧が発生。

7, 8 km/s の衝突で融解、10 km/s の衝突で蒸発が起こる。15 km/s で完全に蒸発。(数字は怪しい)

衝突実験の結果によると、

3 km/s で脱ガス開始 (10²³ kg 月より少し大きいサイズ)

4 km/s で融解の開始 (火星サイズ)

5 km/s で完全融解

8 km/s で蒸発の開始 (地球サイズ)

月より大きくなると、短期間であれば脱ガス大気をまとることができる。

マグマポンドの形成

小さい天体の衝突→融解領域は掘削されて無くなる

大きい天体の衝突→融解領域が全ては掘削されずに残る
(Melosh)

Meteor Crater

Ries Crater

Ries Crater くらい大きいクレーターだとメルト鉱物が少しは残るようになる。

脱ガス大気

揮発性物質を含む微惑星の衝突
衝突脱ガスは月サイズで開始

微惑星から供給される気体：組成

微惑星の組成はよくわからない

隕石と似たものだと思うと...

H₂O : 76.8%、CO₂ : 19.6%、

CH₄ : 2.6%、H₂ : 0.5% N₂ : 0.5%

炭素質隕石からの脱ガス気体

Hashimoto et al, in preparation

平衡組成計算

1000 K くらいで平衡が止まったとすると

還元的気体もかなりある

炭素質隕石からは酸化的なガスが出ると思われていたが、高温での平衡状態を計算すると、H₂・CO などの還元的なガスが出る

微惑星から供給される気体：量

微惑星～隕石の場合

H₂O にして平均 1% 位含まれる

地球の海の質量 / 地球質量

地球の海は地球質量の 0.027% くらい

十分すぎる量が供給される
10~20分の1まで減っても問題ない

還元的環境と酸化的環境

Miller & Urey (1953) の実験
CH₄, NH₃, H₂, H₂O + 火花放電 → アミノ酸

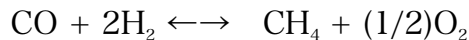
脱ガスのできる大気は CO₂, N₂, H₂O 主体

CO₂, N₂ 大気では生成しない

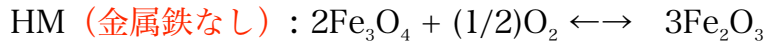
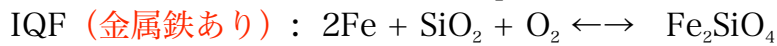
地球外からの持ち込みか？

現在の理解では、脱ガス大気でも還元的になりうる。

岩石・金属鉄との化学反応



バッファー反応



H₂/H₂O

金属鉄が存在すると H₂/H₂O >= 1

金属鉄が存在しないと H₂/H₂O < 1

CO/CO₂

金属鉄が存在すると CO/CO₂ > 1

金属鉄が存在しないと CO/CO₂ < 1

* 結局金属鉄があると還元的な大気が発生する

CH₄/CO₂

金属鉄があるばあいは、低温側では CH₄ が多い

Hashimoto の計算よりもさらに還元側になる

岩石への溶解

H₂O dissolution

マグマポンド中にかなりの H₂O が溶ける

CO₂ dissolution

CO₂ は溶けない

水はマントルの中へ

結果的に H₂O が取り除かれ C が濃縮

金属鉄への溶解

炭素、窒素は金属鉄に溶ける

元々あった炭素の 99%が金属鉄へ→水素が濃集

ここまでのまとめ

気体成分は微惑星によって地球に運び込まれる

運び込まれるのは H₂O や CO₂ が主

最大で地球の海の 40 倍の量の水

地球が月くらいになると衝突脱ガスで地表に出てくる

月以上のサイズでは少なくとも一時的にはこの大気を保持できる

金属鉄との交換を考えると、大量の炭素、水素が取り込まれる

[定性的な大気形成シナリオ]

1. 原始惑星形成過程：太陽組成 + 微惑星脱ガス + 分混合大気の形成
2. 巨大衝突：混合大気の変質
3. レイトベニア成分の付加
4. 大気散逸：水素の散逸、Ne 散逸
5. 連続脱ガス成分の付加

[大気形成の包括的理解へ向けての検討課題]

- ・ 原始太陽系円盤の中での揮発性物質の分布
- ・ 混合原始大気の構造とその性質
- ・ 集積過程での固体惑星内部への揮発性物質分配とその影響
- ・ 巨大衝突直後の高温原始大気 = シリケート大気とその影響
- ・ 集積直後の原始大気の組成
- ・ 大気散逸：impact erosion, hydrodynamic escape

5.地球・金星・火星

Habitability 評価は適切か

これまでのお話がご破算に・・・

起承転結の転→そのまま結が無いまま終わるかも

5.1 地球

全球凍結

テクトニクスの変化に伴って温暖期と寒冷期が繰り返す

地球が全球的に凍結した時期がある？

*最近証拠がたまってきたが、まだ反対する人もいる

全球凍結

低緯度の氷床

低緯度：

古地磁気の俯角からわかる

氷があった証拠：

海底の ice rafted debris など

その直後に高温化した証拠

熱帯の堆積物

大量の炭酸塩

地球史からの課題

1. 全球凍結したとするなら

それでも生命は絶滅しなかった

全球凍結は Habitable Condition からはずして良いか？

どのような意味で Habitable を捉えるか

ある程度大きな生物を考えるなら、全球凍結は Habitable Condition として考える意味がある

凍結状態の期間が問題か？

地球史からの課題

2. なぜ全球凍結したか

炭素循環フィードバックがまともに働いたら凍結するのは困難

テクトニックな変化：1000 万年

炭素循環：10-100 万年

全球凍結から脱出する際には急激な温暖化が起きている、つまり炭素循環フィードバックがまともに働いている

→ なぜ凍結する際には炭素循環フィードバックが働かなかったのか？

フィードバックが働いていたにも関わらず凍結？

温室効果ガスのメタン大気が酸化して急激に寒冷化？ (Kasting)

未だ理解されていない不安定要因？

メタン大気の酸化：惑星大気進化における一般性？

*メタンの起源：生命？メタン合成菌は必然？もともとあった？

*最後の全球凍結の直後に単細胞生物→多細胞生物への劇的進化が見られる → 生物の進化と環境変動は「鶏と卵」問題？

5.2 火星

火星大気

現在の火星気候

火星気候進化の問題

過去に現在とは異なる気候状態があった

例えば流水関連地形

現在は低温かつ低圧であって、多くの場所で液体の水は安定ではない
いかなる原因で、どのように変化したか

5.6hPa→水の3重点圧力付近

水が大気中に出てくれば圧力は稼げる？

→水だけの大気では十分な温室効果が得られないので、結局他の温室効果ガスがないとダメ

*本来火星は非 habitable な状態から habitable な状態へ移るはずだが、実際には昔は水があったのに現在無くなっている

流水地形

主要な問題

1. かつて温暖であったのか
2. ずっと温暖？間欠的に温暖？
3. 温暖化の機構
4. 大気の方
5. 水の方

いかにして、habitable planet が非 habitable planet に変化したのか？

温暖であったのか？

ずっと寒冷であったという主張もある

南極の dry valley のような環境 eg. MacKay

氷点直下であれば水は流れられる

ただし、水があつて氷点直下を維持するのは難しい

← 氷が張るとアルベドが上がって一気に気温が下がるから

*南極の場合は地球全球が氷点直下にあるわけではないので、氷点直下が

実現できている

全球凍結状態：水循環は停止
地球の場合、極地以外は暖かい

全球的に寒冷湿潤で可能か否か

水ではない？！

Nick Hoffman: White Mars: A New Model for Mars' Surface and Atmosphere Based on CO₂, Icarus, 146, 2, 326-342, 2000.

二酸化炭素で flood を作るという考え

Mars Exploration Rovers：水が流れた跡？

CO₂ 凝結問題と雲

雲は温暖化に寄与するが、それほどではない
ただし、もっと検討必要

自分自身を暖めて消えてしまう

温暖化の機構

強い温室効果

二酸化炭素

二酸化炭素の凝結で効かなくなる Kasting

二酸化炭素の雲の温室効果 Forget

それ以外の温室効果

二酸化炭素以外の気体

eg. メタン？

Kasting 1991

光化学反応に弱い：持続しない

Self shielding ? Chyba & Sagan 1997

Galimov 2000

初期に CH₄ rich 大気を考える

金属鉄との反応 (Holland, 1968)

CO₂-CH₄ exchange => 13C-enriched CO₂

CO₂ => carbonate (in water)

loss of CH₄ (impact erosion?)

13C-enriched carbonates => atmosphere

原始大気残存物？

温暖化機構：検討すべきこと

雲の問題

Colaprete & Toon 2003 で考えられていない効果？

* 自分自身を暖める？そんなことはない？これから議論する必要有り

大気組成は整合的なモデル必要

大気形成段階から考えるべき

理論的には太陽組成の原始大気を持つ

それだけでも結構高温になる

どれくらいの期間で散逸するか？

ずっと温暖？間欠的に温暖？

温暖湿润環境が何億年も続いたとして、heavily cratered highland は残るか？

地球では1億年前のクレーターはすでに見えなくなっている

オリビンがそれほど風化されていないことも、温暖湿润環境が長く続いたことを否定

* 水はいつ無くなったか？

→ 少なくとも heavily cratered highland ができた後に水が流れている必要がある（間欠的な水？）

間欠的な温暖化機構

火山活動に伴うガス放出

天体衝突に伴うガス放出

自転軸傾斜の変動

一般には傾斜が大きいほど温暖？

特に高緯度では日射が大きい

間欠的な温暖化は昔ほど多いが、最近でも稀に起きている

間欠的な温暖化問題

間欠的な温暖化機構：

噴火／衝突／自転軸

どれも詳細検討が必要

温暖でないときは？

寒冷湿润環境が実現→全球凍結？

脱出にはより強い温暖化機構が必要

水浸しの Noachean

Clifford & Parker 2001

Carr & Head 2003

Hesperian には $2.3 \times 10^7 \text{ km}^3$ 程度しかない
全球平均 156m
20-30m は極冠、50m は散逸、80m は不明

Vastitas Borealis Formation

海はないのか

Carr & Head は Hesperian にはなかったとだけ
Clifford & Parker 2001 のような Noachean の海については何もいわない
Noachean の active hydrologic cycle はむしろこの時代の degradation
と整合的
逆にいえば Hesperian には active であってはおかしい

大気の方

大気圧は今より高かったはず
水の三重点：6.1mbar 以上
どこへ行ったか
散逸
地殻に固定

散逸

非熱的散逸
本当の散逸量は？
磁場の消滅時期？

Impact Erosion

持ち込み効果が大きい
今の気圧まで減らすことはできない
大気の入替わりには寄与
(濱野)

原始大気の散逸

いつまで持続するか？
水素大気散逸の問題に帰着

地殻への固定

炭酸塩が見えない

現在の気圧は水の三重点気圧に近い
水の存在下で固定された???

北半球低地の問題その他

北半球低地：地殻の厚さの不均一

初期の不均一が保持されるには地殻は冷えていなければならない

深い位置の残留地磁気と整合的

初期の plate tectonics とは整合しない

これをどうやって実現するか

熱水循環による冷却？ Solomon

当然大気進化にも影響する

水の行方と大気の方

必ずしも同じではない

温暖湿潤環境で大気が散逸

→温室効果の減少・気圧の減少

→全球凍結状態への落ち込み？

温暖な環境下で大気が逃げるのはまずい

水と大気が表面から消えるタイミングの問題

水の行方

高い D/H 比→ある程度の散逸を示唆

地下にどれくらい固定されているのか

火星からの課題

1. 二酸化炭素凝結は絶対条件を課さない

雲の温室効果 or 他の温室効果気体

2. なぜ水惑星ではなくなったか

散逸？ or 二酸化炭素固定？

サイズ効果が重要か？

惑星の位置 (habitable zone) よりもサイズ効果が重要？

サイズリミットを決めなければならない

重力が小さい

低い熱圏温度で散逸

内部が冷えやすい＝脱ガスが起こらない

二酸化炭素が固定される一方になる

内部が冷えやすい＝磁場を失う

高エネルギー粒子降り込み＝大気を加速

*結局これらのうちのどれが効いて水惑星でなくなったかを考える必要がある

*窒素が少ない問題は どうする？ まだよくわからん、初期大気が重要かもしれない

5.3 金星

現在の金星大気

92 気圧

CO₂:96.5%

N₂:3.5%

H₂O<150ppm

金星大気の問題

大量の二酸化炭素はいつからあるか

いつから高温か

水はなぜ無いか

大量の ³⁶Ar がある理由

大気循環の問題：4日循環 SuperRotation

.....

上から3つが habitable 条件に関わる問題

水がないことの説明

暴走温室効果と水の散逸

金星軌道では暴走温室効果が発生し得る

太陽放射 > 654W/m²

大気上層の水蒸気が多くなる

現在より 10 倍程度大きい極端紫外線で 10 億年で水蒸気を失える

D/H 比は地球の 100 倍

本当か??

酸素の処理は?

一緒に散逸? 大気を酸化?

大気を酸化させるためには、還元的な気体がたくさん必要 (そもそも組

成が違うという話になる)

D/H 比は地球の 100 倍

=現在の 100 倍は水蒸気があった

しかしこの量では少なすぎ

D/H 比を変えない散逸が起こったか？

散逸の最後 (散逸が遅くなったとき) に D/H 比が一気に上がる

→ 最初から水が無かったと思うしかない？

元々少ない方が D/H 比は説明しやすい

さらに...

暴走発生以前に海があると二酸化炭素は炭酸塩に固定

どうやって出てくるか？

脱ガス？ しかし ^{40}Ar が少ない

脱ガスすると $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ ができてしまう

元々水が少なかったのでは？

^{36}Ar の量が非常に多い

惑星全体を炭素質隕石で作らないと説明不可

地球とは違う材料から大気ができた可能性がある

少なくとも volatile の供給源が地球とは違う

金星：海がない状態での Giant Impact で原始大気を残している？

* 地球表面の C 量と金星表面の C 量はほぼ同じで、材料物質 (隕石) よりも 2 ケタ小さい

* 2 ケタ小さい問題をどうするか？

炭素循環で減らす？ → 5kbar の C を減らすのはちょっと厳しい

金属鉄反応を考える？ → 惑星集積中に減らすしかない

* C 問題は habitable planet を考える上で重要、うまく C を処理してあげないと惑星は水を保持できない！

大気中の二酸化炭素量

地面に存在する炭酸塩と化学平衡にある

ちょうど今の金星大気の温度圧力は炭酸塩岩石と化学平衡の値に近い

Carbonate Buffer 仮説

大気量は平衡状態で維持されている

これはだめ！

地面に炭酸塩があることは示されていない

理論的に地面の炭酸塩では大気量を Buffer できない (Topographic Greenhouse Instability)

二酸化炭素の量は最初からあった量であろう

ちょうど地球表層部の炭素量に近い

金星からの課題

1. 揮発性物質の供給問題

適量の水が供給出来ない可能性

形成段階で出来る大気組成が地球と異なる？ (by Giant Impact)

連続脱ガス段階

2. 進化過程

*結局 habitable planet の観点から地球・火星・金星を見てみたが、、、なんかよくわからん、もっとちゃんと考える必要有り

6. 惑星気候学

表層環境を決めること

- 1 いわゆる気候
- 2 大気散逸
- 3 固体惑星の挙動
- * 大気そのもの+上側下側の境界条件

このうち1+3：惑星気候（とりあえず、ここでは1について考える）
ここでは長期変動について考える

従来理解の問題点 全球平均量で考えている

1. 緯度変化・季節変化を無視
= 離心率・自転軸傾斜を考えていない
2. 全球で水があることを要求
= 局所的に水がある場合は考慮の外
ちゃんと（2次元、3次元的な）気候を考えないといけないであろう

氷期間氷期変動

軌道要素の変動：ミランコビッチ周期

氷期間氷期変動
自転軸傾斜のわずかな差
夏と冬の日射量の差の変動
大きく気候に影響する

6.1 表面の不均一

陸惑星と海惑星

Habitable Zone Limits for Dry Planets

Y. Abe, A. Abe-Ouchi, N. H. Sleep, and K. J. Zahnle
in preparation

局所的に水が存在する系

H₂O はしばしば地球環境を安定化していると言われるが、必ずしもそうとは言えない。

非常に強い正のフィードバック効果を持つ

- ・強い温室効果気体
蒸発するほど温室効果を強める
- ・アイスアルベドフィードバック
凝結するとアルベドをあげ、寒冷化させる

海惑星と陸惑星

Aqua Planet 海惑星

惑星表面が（海洋によって）常に湿った状態に保たれている
<降水と蒸発は局所的にはバランスしない>

Land Planet 陸惑星

惑星表面の水分布は大気中の循環で支配される
<降水と蒸発が局所的にバランスする>

陸惑星とは

地表での水の分布が大気中での水輸送で支配される惑星
蒸発が降水に勝る地域は乾燥
海がない
海は蒸発が降水に勝る場所にも存在できる eg 地球中緯度
比較的少量の水がある惑星で期待される（どれくらい少量かはわからない）
非常に昔（Noachian）の火星も陸惑星的だった可能性
<水の局在化>

陸惑星モデル

CCSR/NIES AGCM 5.4g
地球モデルで、地形と海もなくす
大気は1気圧の地球大気
初期に地面には一様に水を供給し、湿らせる
地面には川はない：水輸送は大気中だけ
約10年モデルを走らせて定常状態を実現
暴走温室効果
地面が湿っている惑星には、射出できる惑星放射に上限がある： 射出限界

暴走温室効果

射出限界を超える太陽放射が入射すると、どんなに大量の水があっても、
全て蒸発するまで、温度上昇する
水が少なければもっと容易に蒸発する
射出限界以上の入射があると液体の水は地表に存在できない

水の量が多いと？

一次元モデルの罠

水が全部蒸発すれば暴走は止まる
しかし、そのときには地面には水は残らない

水が多い惑星の暴走温室効果

現在の地球：低緯度では射出限界を超える入射がある
全球平均すると限界以下

低緯度の過剰分を高緯度で射出

水が多い惑星の暴走温室効果

暴走状態：平均して射出限界を超える入射がある

惑星放射は限界を超えられない

放射収支が合わず、温度上昇→海が全て蒸発

原理的には3次元の結果は1次元で予測される結果と一致するはずである

水が少ない惑星の場合（太陽放射が小さい場合）

陸惑星：水は大気中で輸送されて低温の高緯度へ

地面が乾燥しているところでは惑星放射は射出限界を超えられる

低緯度の過剰分を高緯度で射出

水が少ない惑星の場合（太陽放射が大きい場合）

平均して射出限界を超える入射がある場合

乾燥した低緯度は射出限界を超える惑星放射を射出

高緯度では惑星放射は射出限界以下

高緯度では水が存在できる！

実験概要

水浸しではなく、水が局在できる惑星で射出限界を検討

そのために大気大循環モデルを利用

惑星表面に平均 20cm, 40cm, 60cm の深さの水を置く

射出限界の発生には 40cm 程度の水で十分

太陽放射を変化させて、表面から液体の水が無くなる太陽放射を探す

水の置き方は3通り

高緯度に集中させておく＝低緯度は乾燥

全球一様に分布

全て蒸気にする（大きい太陽放射を初期値にする）

モデルの概要

CCSR/NIES AGCM 5.4g

地球モデルで、地形と海もなくす

大気は1気圧の地球大気

初期に地面には一様に水を供給し、湿らせる

地面には川はない：水輸送は大気中だけ

約10年モデルを走らせて定常状態を実現

こうすると高緯度に水は局在化する

太陽放射を変えてさらに10年モデルを走らせて定常状態を実現
その後の10年間の平均値を解析

地面水量と相対放射

海惑星、射出限界 $\sim 307\text{W/m}^2$ (相対湿度 100%の場合)

石渡さんのGCMの計算では相対湿度 65%になり射出限界は 350W/m^2 ぐらい

陸惑星、射出限界 $\sim 420\text{W/m}^2$

地面水量と正味太陽放射

可降水量と正味太陽放射

積雪量と正味太陽放射

平均地表温度と正味太陽放射

地表温度分布と相対放射

成層圏の水蒸気量の問題

成層圏上部の水蒸気量は極端に小さい ($\sim 10^{-9}$) :

非常にわずかな水の量 (平均 1mm) でも長期間安定に存在できる

水の存続時間

陸惑星の場合、成層圏の水蒸気量は少ないので、もともと少なかった海でさえ長期間保持する。

完全凍結限界

陸惑星の場合、凍りにくくなる。

まとめ

海惑星：海が長期存在できる範囲 90~110%

陸惑星：水が長期存在できる範囲 77~170%

同じ大気条件であれば、水が安定に存在出来る条件は、海惑星の方が陸惑星より狭い

大した違いではないように見えるが、Habitable Zoneの幅は3倍以上広がる

質問：海惑星が暴走温室状態で水が失われたら、陸惑星になって、ハビタブルになるのか？

答え：いったん暴走温室状態になったら全部水が失われてしまうだろう。したがって、最初から水が少ない陸惑星じゃないと広いハビタブルゾーンを持たない。

陸惑星 vs 海惑星

海惑星：地球的 陸惑星：火星的

どこまで大量の水があると海惑星になるか
水面が惑星全体で等ポテンシャル面
等ポテンシャル面に沿って分布する時間 vs 大気中の水輸送で局在化する
時間
地形的起伏とのかねあい
惑星が持つ水の量の規定要因
歴史性

“Dune”砂の惑星

Herbert, F. (1965) *Dune*, Clinton, New York, pp. 535.

6.1 自転軸傾斜

直立モードと傾斜モード

Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars. Yutaka Abe, Atsushi Numaguti, Goro Komatsu, and Yoshihide Kobayashi
Icarus, 178 (1), 27-39, 2005

自転軸傾斜と日射量

自転軸傾斜の大きな変動

火星と地球の違い

火星と地球でなぜ自転軸傾斜変動が違うのか

地球＝月があるから

月の効果：月がないと自転軸傾斜変動大

自転軸傾斜と気候

月の影響：月がないと気候は極端に変化

月がある場合、自転軸傾斜角の変動～1度

月がない場合、10度以上変動

実験の概要

自転軸傾斜の影響

0度、15度、23.5度、30度、45度、60度、75度、90度

温暖な場合と寒冷な場合

太陽放射＝現在の地球、その半分

円軌道、地球と同じ自転公転周期

4つの気候モード

直立モード (23.5 度の場合)

夏半球の高緯度でのみ降水がある

傾斜モード (60 度の場合)

寒冷モード (60 度の場合)

直立モードと傾斜モード：ハドレーセルの幅との関係

Sato (1994)

$$\theta < \sin^{-1}(R/(2+R))^{-1/2}$$

$$R = gH\Delta / (a\Omega)^2$$

温度ピークの位置がこの範囲を超えると上昇位置と温度ピークが一致しない

勾配が大きい極限で 25.5 度

温暖直立モード

温暖傾斜モード

自転周期をかえると？

4つのモードのまとめ

温暖直立モード

自転軸傾斜 < ハドレーセルの幅

本来降水は高緯度のみ、低緯度は乾燥

温暖傾斜モード

自転軸傾斜 > ハドレーセルの幅

どこでも降水がある季節がある

同じ太陽放射なら直立モードより暖かい

夏の中緯度で東風卓越

4つのモードのまとめ

凍結直立・傾斜モード

全球凍結状態

事実上水輸送は停止

最も暖かいところで降雪：温暖モードと違う

直立モードと傾斜モードがある：風・降水分布は異なる

自転軸傾斜と凍結限界

直立モードの場合は太陽放射の 77%

傾斜モードの場合はもっと小さい太陽放射まで耐えられる。60度の時、58%

自転軸が傾いた場合の方が全球凍結しにくい

凍結における自転軸傾斜の影響

現地球大気で太陽放射を変えて全球凍結が起こる条件
(現在の地球軌道での太陽放射に対して)

自転軸傾斜

太陽放射

23.5°

77%

45°

70%

60°

58%

凍結条件はモード依存！

質問：なぜ、傾けると凍りにくくなるのか？

答え：ハドレー循環は熱輸送効率がよいため、直立モードでは、全球の温度を均質化する。そのため、全球凍結しやすい。逆に、傾斜モードでは、ハドレー循環が弱いため、南北の温度差がつきやすく、極で暖かくなる。

質問：海惑星の場合の自転軸傾斜角の影響は？

答え：基本的に陸惑星と同じように、傾けると凍りにくくなる。その理由は上の質問のメカニズムと同じだから。

6.2 離心率

異形の惑星*

Hot Jupiter

太陽近傍の木星

Eccentric Planet

離心率大の惑星

惑星軌道離心率と habitability

小西悌之・阿部豊

離心率の日射量への効果

離心率が大きくなると年平均日射が大きくなる。e=0.3 ぐらいまではあまり変化なし

4つの状態

非全球凍結
一時全球凍結
年平均暴走温室
永久全球凍結

離心率が大きいときは海惑星がハビタブル

射出限界があるときの方がハビタブル（近点付近での暴走温室効果によって水蒸気の潜熱を蓄えるので、遠点で冷えない）

離心率が大きいとハビタブルゾーンが広がる

（降水量は射出限界で制限されている。実際に、熱帯の降水量もローカルで 300 W を超えていない。）

6.4 内部の活動：多重性と関連して プレート運動による地球環境の安定化 二酸化炭素固定の問題

凍結は二酸化炭素他の温室効果気体量に依存
惑星内部からの脱ガスと
表面での炭酸塩固定のバランス
陸惑星では後者はおそらく非常に遅い（CO₂はあるが水がないから）
＝温暖化しやすい

気候の多重性

全球凍結，部分凍結，無凍結で水が存在，無凍結ですべて蒸発

多重性

ヒステリシスがある
*凍結側のヒステリシスは温室効果ガスが惑星内部から供給されることで消える可能性有り：Snow ball Earth
*惑星内部の活動の重要性
*蒸発側のヒステリシスは消えない
一度蒸発してしまうと宇宙空間に散逸
太陽放射は増大傾向

Vapor と Water のヒステリシスは金星の起源を考える上で重要？

地球と似た環境を作る条件はかなり微妙

その反面で地球と必ずしも似ていない多様な Habitable 環境がありえる

両者を併せたとき、Habitable Planet は少なくはなさそうだが、

まとめ

1. 地球的ではない惑星の気候の理解

軌道要素の影響

自転軸傾斜や軌道離心率

自転周期

大きな海がないがしめっている場合

水循環の効果

2. 惑星内部の影響

惑星テクトニクスの影響 (地球では水があることでテクトニクスが活性化されている可能性)

表面の水と惑星内部

7. 生存可能惑星の形成

惑星形成の理論

Ida and Lin 2004

木星型、天王星型、地球型惑星

現在は、観測で大きいもの（木星型）しか見えていない

惑星系の10%くらいはハビタブルな地球型惑星？

従来の理解の問題点

1. 水は適量が必ずあるのか？

2. 惑星の大きさの条件は？

大きくなると水素が逃げない。→ハビタブルであるか疑問。

重力の問題

3. 軌道半径だけでよいか？

= 離心率・自転軸傾斜による緯度変化・季節変化を無視

4. 惑星表面の不均質性を考えない

5. 地球的テクトニクスを考えている

つまるところ地球型惑星の多様性を考えてない

ハビタブルゾーンにあれば必ず「地球」になるのか？ 金星や火星になっ

てもよいのではないか？

水の供給と大気形成

水の量の問題

地球の水 総質量の0.027%

全体としてみればわずかな量

天王星型惑星は60~70%が水

地球型惑星の中では非常に多い

火星・金星にはこんなない（金星は全然ない、火星はわからない）

地球上では他の揮発性物質に比べて多い

H₂O の普遍性

水はHとOから大量にできる

まずMg, SiがOを使う、CがOを使う、残りがH₂Oになる

水を減らすためにはCを多くする必要

水の存在

炭素に酸素がとられてしまわない限り、かなり大量の水が形成されることはたしかであろう

その意味で水が得にくいことはあまり無いと思われる

適量の水

岩石と水が適当な量比で存在すること
これは Habitability の条件か？
水だけで生き物が出来ているわけではない
他の材料が十分な濃度で存在しなければならない
天王星・海王星は多すぎ？

水浸しになりやすい？

町田学位論文に依れば
地球型惑星領域にも氷微惑星が出来たはず
昇華しながら集積するがかなりの水が残ることが多いように見える

光学的に厚い円盤の温度

細かいダスト ➡ 光学的に厚い円盤

円盤表面:

太陽輻射によって加熱（林モデル的）

円盤内部:

円盤表面からの輻射によって加熱

光学的に厚い円盤の温度

太陽光はかすように入射

太陽輻射フラックスは、垂直に入射したときの α 倍

円盤内部: 円盤表面からの輻射によって加熱

- ・ 円盤表面からの輻射の 1/2 は円盤外へ失われる
- ・ 入射フラックスと赤外放射フラックスの釣り合い

原始惑星の含水率: パラメータ依存性

原始惑星の含水率: パラメータ依存性

微惑星形成と円盤が薄くなるタイミングのが重要

いちばん昇華しやすい見積もりになっている。実際はこれほどは水が抜けないだろう。

水を 0.027%にするのはけっこう大変

揮発性元素の供給源

太陽系の地球型惑星の大気はいわゆる二次大気である

そのことの意味？

必ずそうならなければならない理由はないが

相当異なる組成の大気となる

太陽組成ガスの分子組成

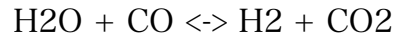
H₂O と CO が多い。当モル比。

太陽組成の 1 次大気を捕獲して参加を受けなかった場合、H₂O が残らな

い？

H₂O は大量に存在するが、CO も多い

適切に酸化しないと



となって失われる可能性

課題はたくさんある

揮発性物質の供給源

水が多すぎないこと (けっこう厳しい?)

惑星表面での化学反応と元素交換

惑星大気形成論の再構築

[水を減らすプロセス]

・大気散逸

・金属鉄に H を取り込む

→あわせて2%くらいだろう