

同期回転系外惑星の気候不安定性

Kite, Gaidos & Manga (2011),
“Climate Instability on Tidally Locked Exoplanets”,
The Astrophysical Journal, 743, 1, 41 の紹介

神戸大学 大学院理学研究科
地球惑星科学専攻 D3
納多 哲史

2012/06/18 惑星大気研究会オンラインセミナー

この論文を選んだ理由

- 発表者は同期回転惑星の気候の多様性を知るために GCM 実験を行っている
- 長期的な気候の安定性についての知識を得ることで、現在自分が行っている実験設定がどれほど意味があるか、今後どのような設定で計算を行っていくべきかの判断材料としたい

論文目次

- はじめに
- モデル記述
- 結果 1: Enhanced Substellar Weathering Instability (ESWI)
- 結果 2: Substellar dissolution feedback (SDF)
(今回のセミナーでは割愛)
- 議論
- まとめと結論

はじめに

- 系外惑星探査の動機のひとつに生命生存可能惑星の発見がある
 - 表面に液体の水を「長期間」保持する惑星
- 液体の水を地質学的時間以上安定に保持するには？
 - 地球の場合, CO₂ 分圧による地表面温度の制御と温度依存する鉱物風化率の間のフィードバックが重要 (Walker et al. 1981). (後述)

はじめに

- M 型星近傍を公転する同期回転惑星
 - 地表面に液体の水が存在する惑星のうち, 現在の観測で発見される見込みが高い
 - M 型星のハビタブルゾーンにある惑星は, 主星の潮汐力によって同期回転していると考えられる
- 同期回転惑星において気候の不安定化が起こる可能性がある
 - Enhanced Substellar Weathering Instability (ESWI)
 - Substellar dissolution feedback (SDF) (今回のセミナーでは割愛)

炭素循環

珪酸塩鉱物の風化 (陸上): $\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$

炭酸塩の生成 (海中): $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

炭酸塩の風化 (陸上): $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

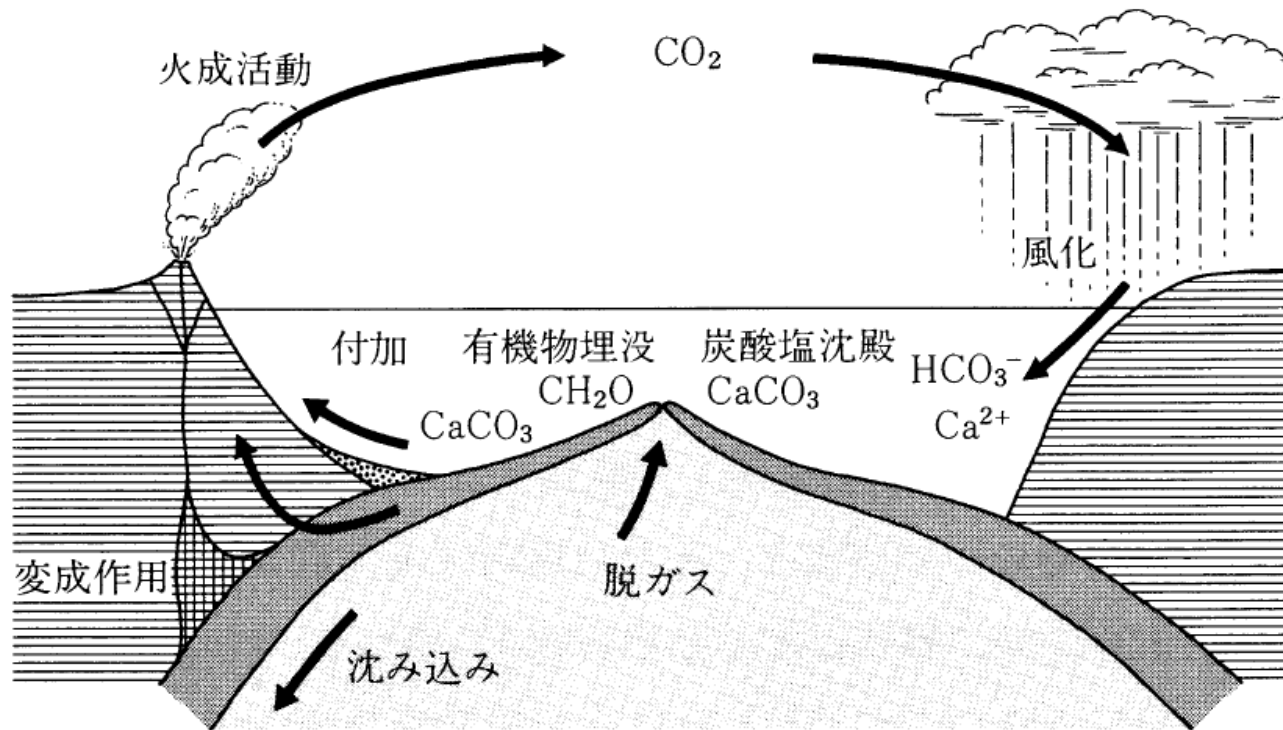


図 2.4 数十万～数百万年以上の時間スケールで見た場合の炭素循環システム (Tajika and Matsui (1992) にもとづく).

炭素循環による負のフィードバック

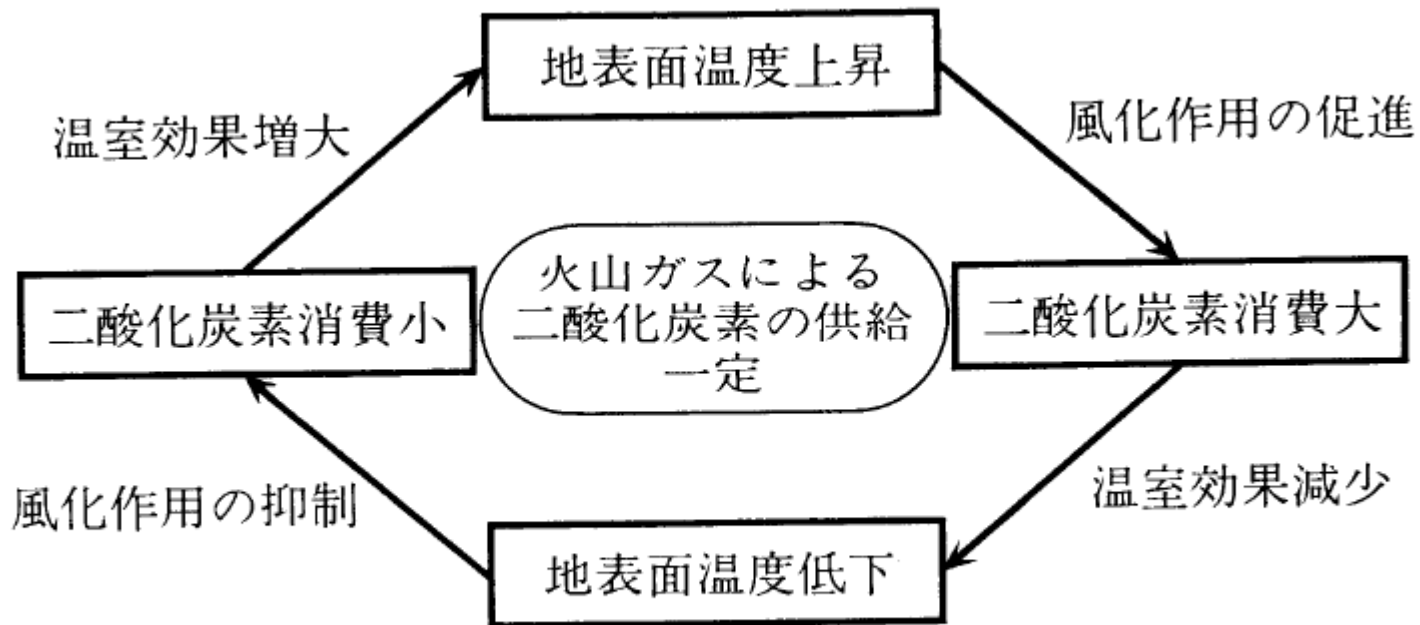


図 2.6 炭素循環システムにおける負のフィードバック機構の概念.

Enhanced Substellar Weathering Instability (ESWI)

- 前提
 - 大気の主成分は温室効果ガス
 - 温室効果ガスの消費には風化が支配的
 - 温度が上昇すると風化率が著しく上昇する
 - 恒星直下点付近の地表面温度が他の場所より十分高い
 - 大部分の風化が恒星直下点で起こっている
 - 気圧が増加すると恒星直下点付近の地表面温度が下がる
- ESWI のシナリオ
 - 最初に, 風化と温室効果ガスの供給 (火山脱ガスなど) がバランスしているとする
 - 何らかの理由により気圧がわずかに増加 (減少)
 - 惑星全体では地表面温度が増加 (減少) するが, 恒星直下点では減少 (増加)
 - 惑星全体の風化が減少 (増加)
 - 温室効果ガスの消費が減少 (増加) するため, さらに気圧が増加 (減少)
 - いずれ暴走温室状態 (大気崩壊) に至る可能性がある (?)

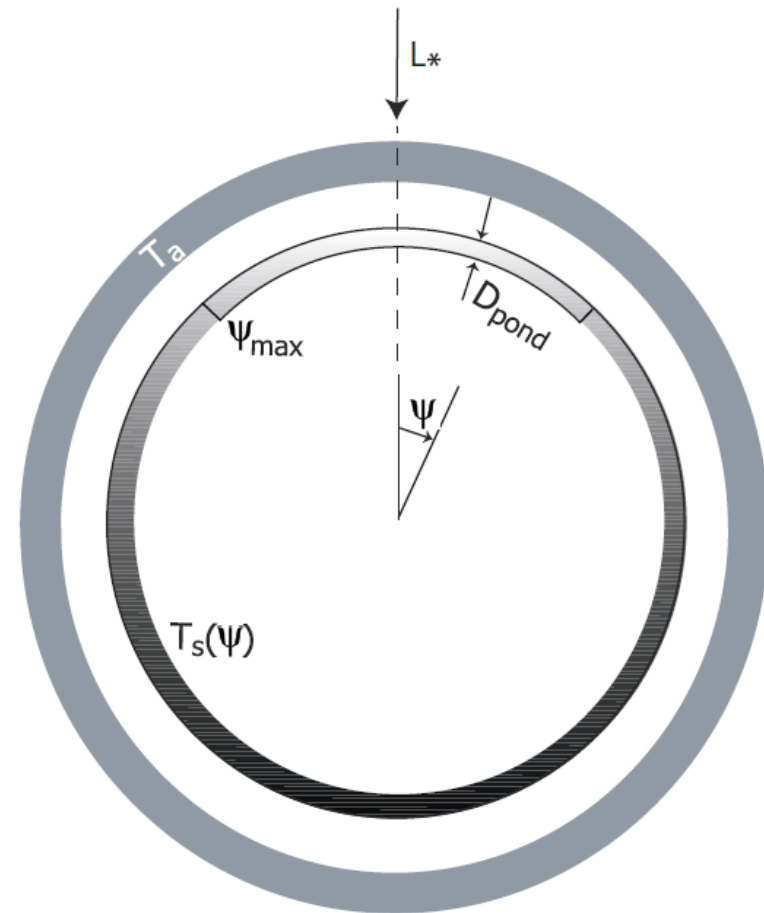
方法と目的

- エネルギーバランスモデルを作成し, 同期回転惑星に発生するかもしれない不安定の発生条件を調べる

モデル記述

系の設定

- 同期回転日射条件
- 気温は乾燥断熱減率で高度とともに減少
- 惑星の回転は遅く, コリオリ力は小さい
 - 暗に, 昼夜間対流の卓越を想定しているであろう
 - 境界層上端の気温 (T_a) は水平一様 (Merlis & Schneider, 2010)
 - 物理量は恒星直下点からの角度 (ψ) の関数で表す
- 地表面より下側の熱輸送は無視 (海洋は局在または存在せず)
- 地球内部からのエネルギーフラックスは十分小さい
- 境界層と地表面は乱流フラックスを通してのみ相互作用する



ψ : 恒星直下点からの角度距離

地面のエネルギーバランス (1)

$$SW_s(\psi) - LW \uparrow(\psi) + LW \downarrow - \beta(T_s(\psi) - T_a) = 0 \quad (1)$$

$SW_s(\psi)$: 地表面が吸収する短波入射フラックス (= $L_* (1-\alpha) \cos \psi$)

L_* : 恒星のフラックス

α : 地表面アルベド

$LW \uparrow(\psi) = \eta \sigma T_s^4$: 地表面からの長波放射

σ : Stefan-Boltzmann 定数

η : Emissivity at thermal wavelength ($\doteq 1$)

β : 乱流熱輸送係数 (= $k_{TF} \rho$)

ρ : 表面付近の大気密度 (地球の海面気圧で規格化)

$k_{TF} = C_p(T_a) C_D U$: 乱流フラックスの比例係数

$C_p(T_a)$: CO₂ の比熱 (300 K において約 850 J kg⁻¹ K⁻¹)

$C_D = k_{VK}^2 / \ln(z_1/z_0)^2$: 抵抗係数

k_{VK} : カルマン係数 (=0.4)

z_1 : 参照高度 (= 10 m)

z_0 : 地表面の粗度長 (= 10⁻⁴ m)

U : 地表面近くの特徴的な風速 (= 10 m/s)

T_a : 大気境界層上端の温度 $T_a = \frac{1}{2} \int_0^\pi T_s(\psi) \sin \psi d\psi$

地面のエネルギーバランス (2)

$$SW_s(\psi) - LW \uparrow(\psi) + LW \downarrow - \beta(T_s(\psi) - T_a) = 0 \quad (1)$$

- $LW \downarrow(\psi)$: 大気からの長波放射

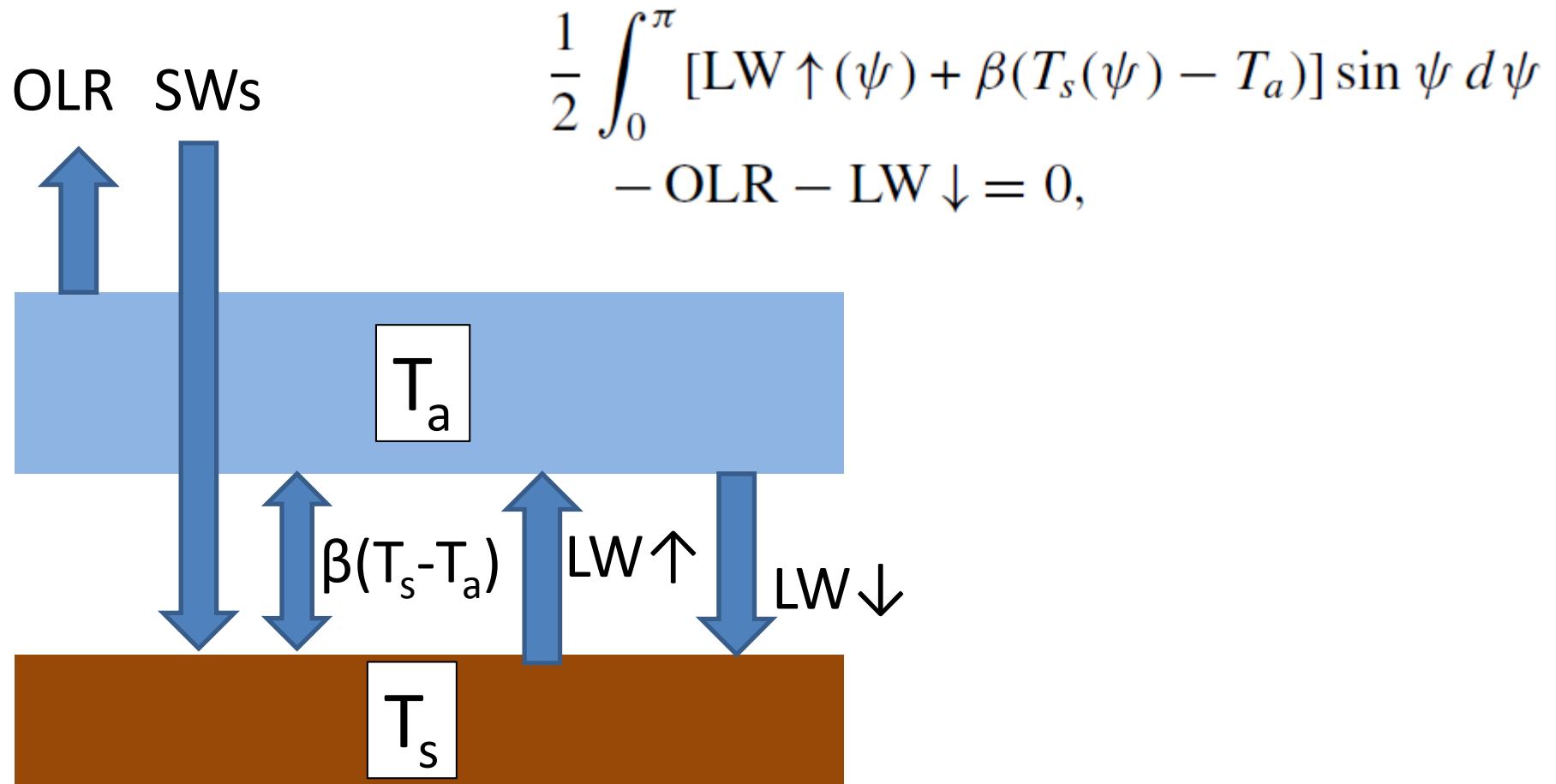
$$LW \downarrow = \frac{1}{2} \int_0^\pi LW \uparrow(\psi) \sin \psi d\psi - OLR$$

- $OLR (P_\Lambda, T_s)$: dry adiabat における純粋な非凝結 CO₂ 大気を仮定 (Pierrehumbert のモデルを一部改変)
 - $P_\Lambda = \Lambda P$
 - Λ : opacity ratio (相対 radiative efficiency). 興味のある気体と純粋な非凝結 CO₂ の光学的厚さの比

大気のエネルギーバランス

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi [\text{LW} \uparrow (\psi) + \beta(T_s(\psi) - T_a)] \sin \psi d\psi \quad (2)$$
$$- \text{OLR} - \text{LW} \downarrow = 0,$$

系の概要



$$\frac{1}{2} \int_0^\pi [LW \uparrow(\psi) + \beta(T_s(\psi) - T_a)] \sin \psi d\psi - OLR - LW \downarrow = 0,$$

$$SW_s(\psi) - LW \uparrow(\psi) + LW \downarrow - \beta(T_s(\psi) - T_a) = 0$$

風化パラメタリゼーション

(Berner & Kothavala (2001))

$$\frac{W_\psi}{W_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5} \times \underbrace{\exp[k_{\text{ACT}}(T_s(\psi) - T_o)]}_{\text{direct } T \text{ dependence}} \underbrace{[1 + k_{\text{RUN}}(T_s(\psi) - T_o)]^{0.65}}_{\text{hydrology dependence}}, \quad (3)$$

W_ψ : 局所風化率

W_0 : 参照風化率 (pCO₂ = 3 mbar における値)

P_0 : 参照気圧 (= 1 bar)

T_0 : 参照温度 (= 273 K)

k_{ACT} : 活性化エネルギー一定数 (= 0.09)

k_{RUN} : 地球 GCM の結果にフィットした温度-流出係数

惑星平均風化率

$$W_t(P) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi W_\psi A_\psi d\psi \quad (4)$$

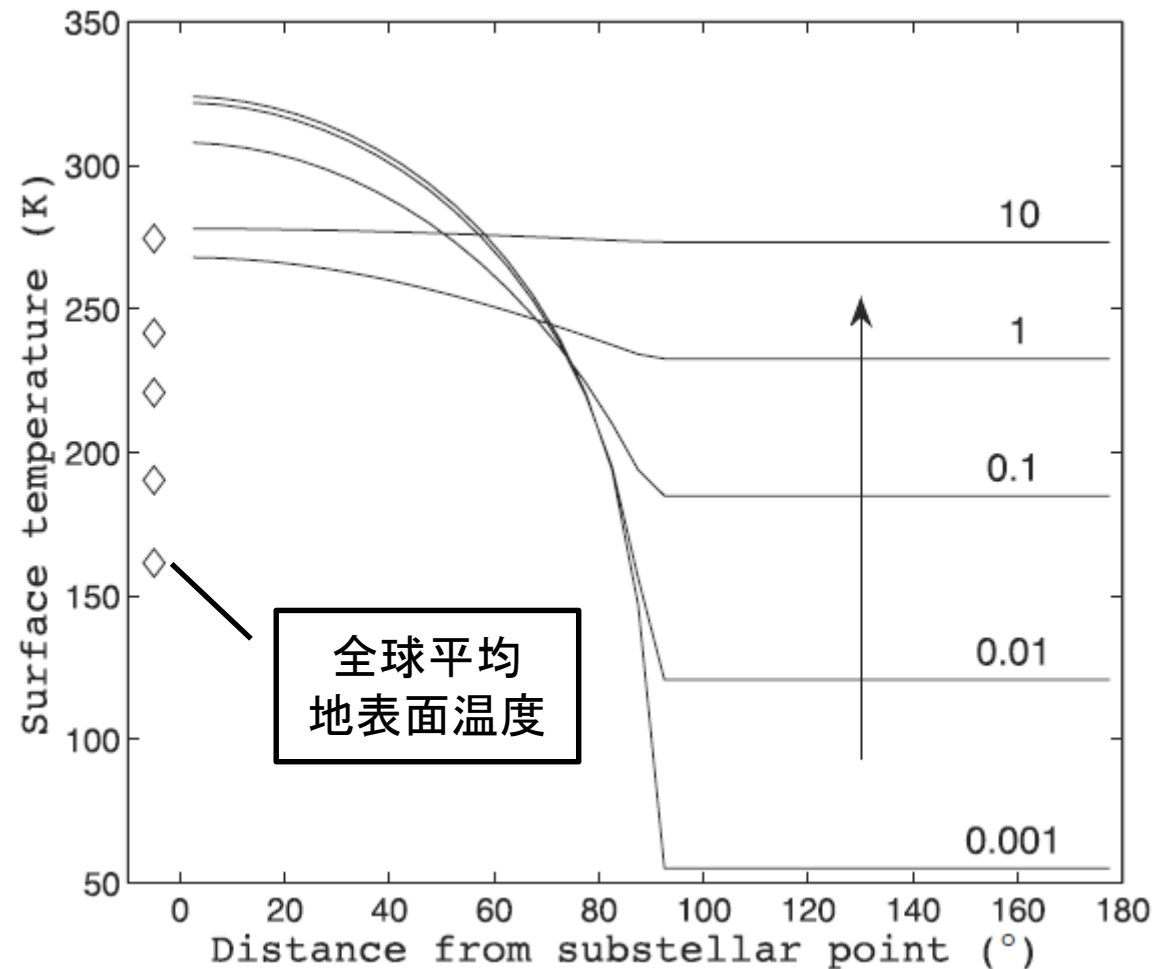
計算設定

- ψ の解像度: 5°
- 初期条件:
 - 地表面: 放射平衡
 - 大気: 地表面温度分布に平衡
- 収束の許容誤差: 2×10^{-6} (K?)

結果

地表面温度 ($\Lambda=0.1, L_*=900 \text{ W/m}^2$)

- 気圧が低い時
 - 昼夜の T_s の差大きい
 - 気圧の増加に伴い $\psi > 60^\circ$ が温暖化, $\psi < 70^\circ$ が寒冷化
 - 恒星直下点付近では乱流拡散の寄与が卓越
- 気圧が高い時
 - ほぼ等温
 - 気圧の増加に伴い全ての場所が温暖化
 - $\Lambda > 0$ による温室効果



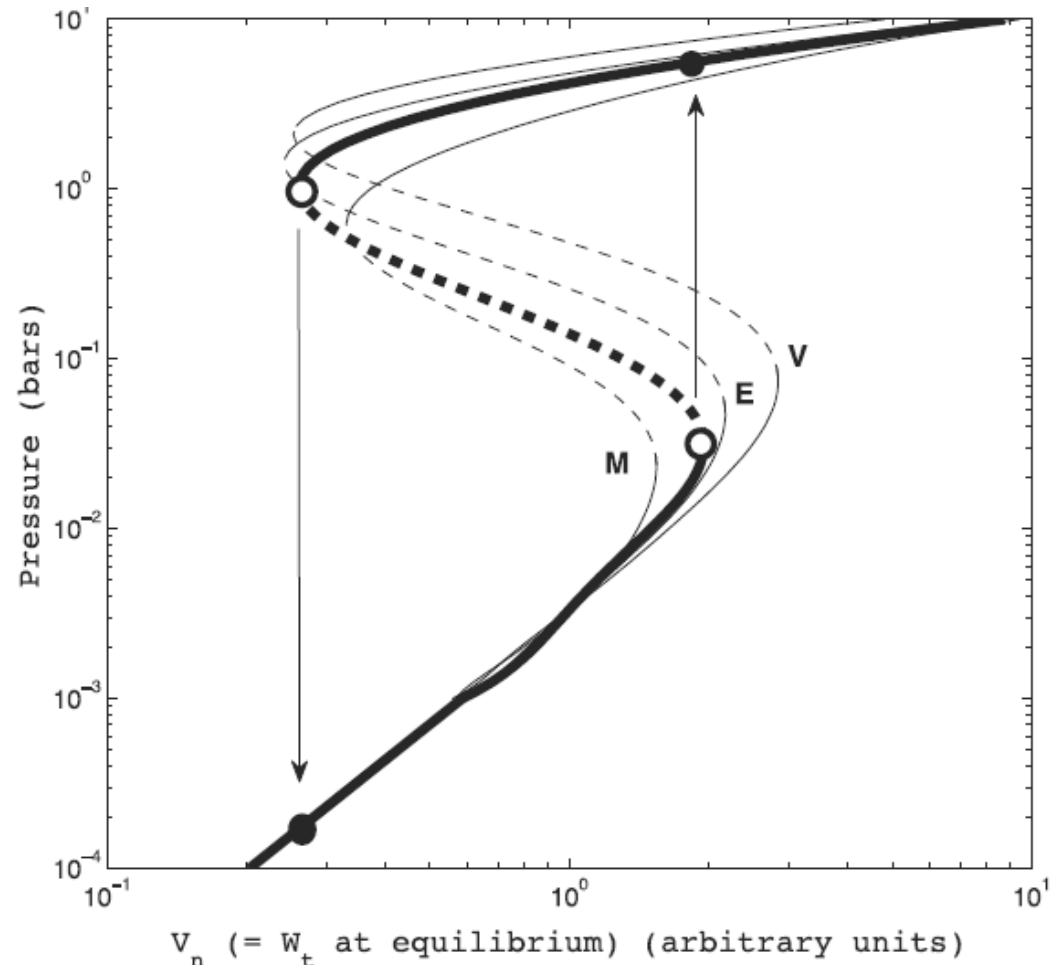
風化率

$$SW_s(\psi) - LW \uparrow(\psi) + LW \downarrow - \beta(T_s(\psi) - T_a) = 0$$

$$\frac{W_\psi}{W_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5}$$

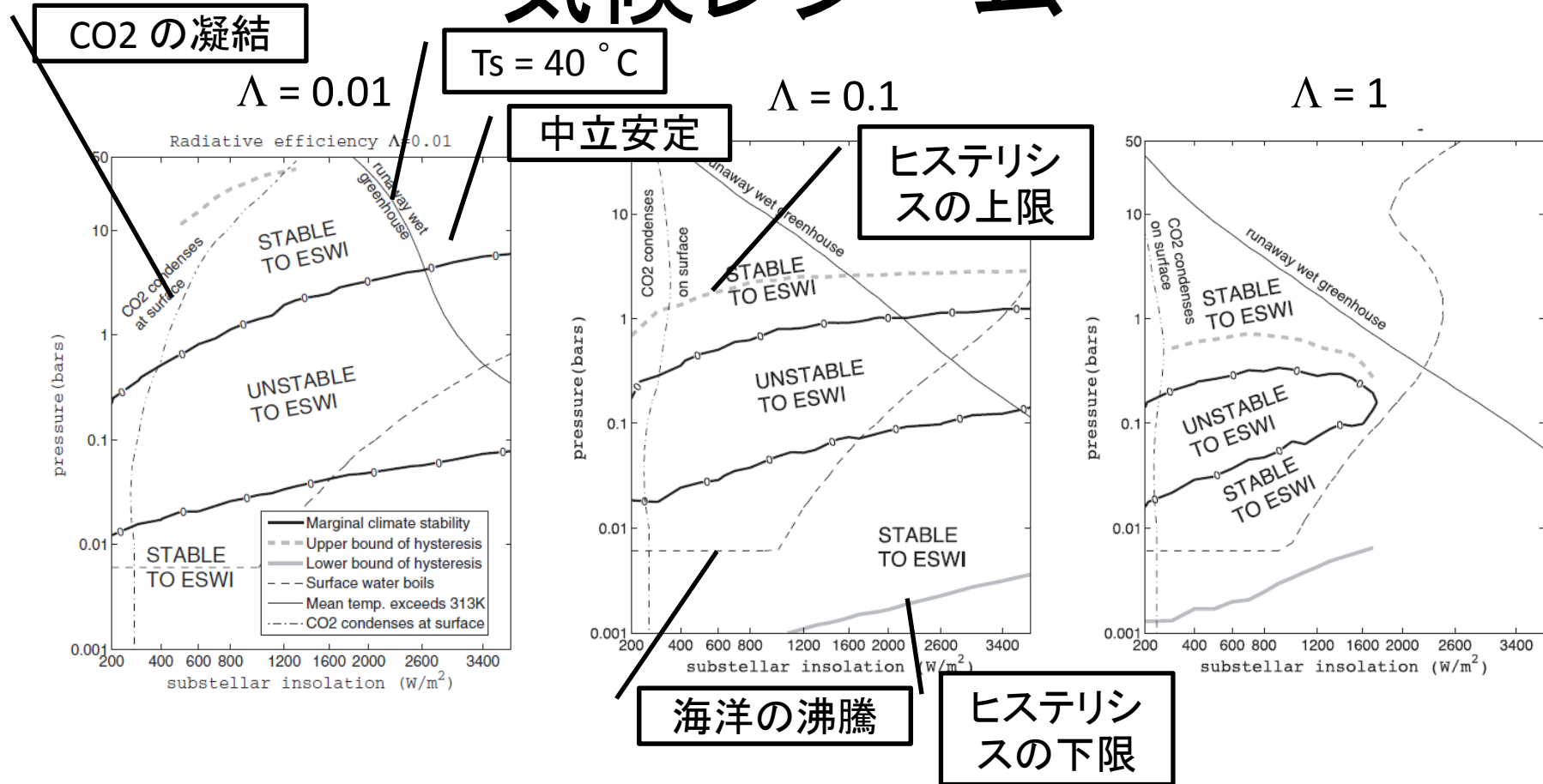
$$\times \underbrace{\exp[k_{ACT}(T_s(\psi) - T_o)]}_{\text{direct } T \text{ dependence}} \underbrace{[1 + k_{RUN}(T_s(\psi) - T_o)]^{0.65}}_{\text{hydrology dependence}},$$

- 低圧 (安定):
 - 風化の (P/P_0) を含む項が卓越
 - $\beta (= k_{TF} \rho)$ や τ が小さく大気温度は T_s へほとんど影響せず
- 中間圧力 (不安定):
 - 乱流拡散の効果が光学的厚さの効果を上回り, 圧力上昇とともに恒星直下点が寒冷化
- 高圧 (安定):
 - 光学的厚さの効果が乱流拡散の効果を上回り, 圧力上昇とともに惑星全体が温暖化



V_n : 風化以外の過程による正味の温室効果ガス供給

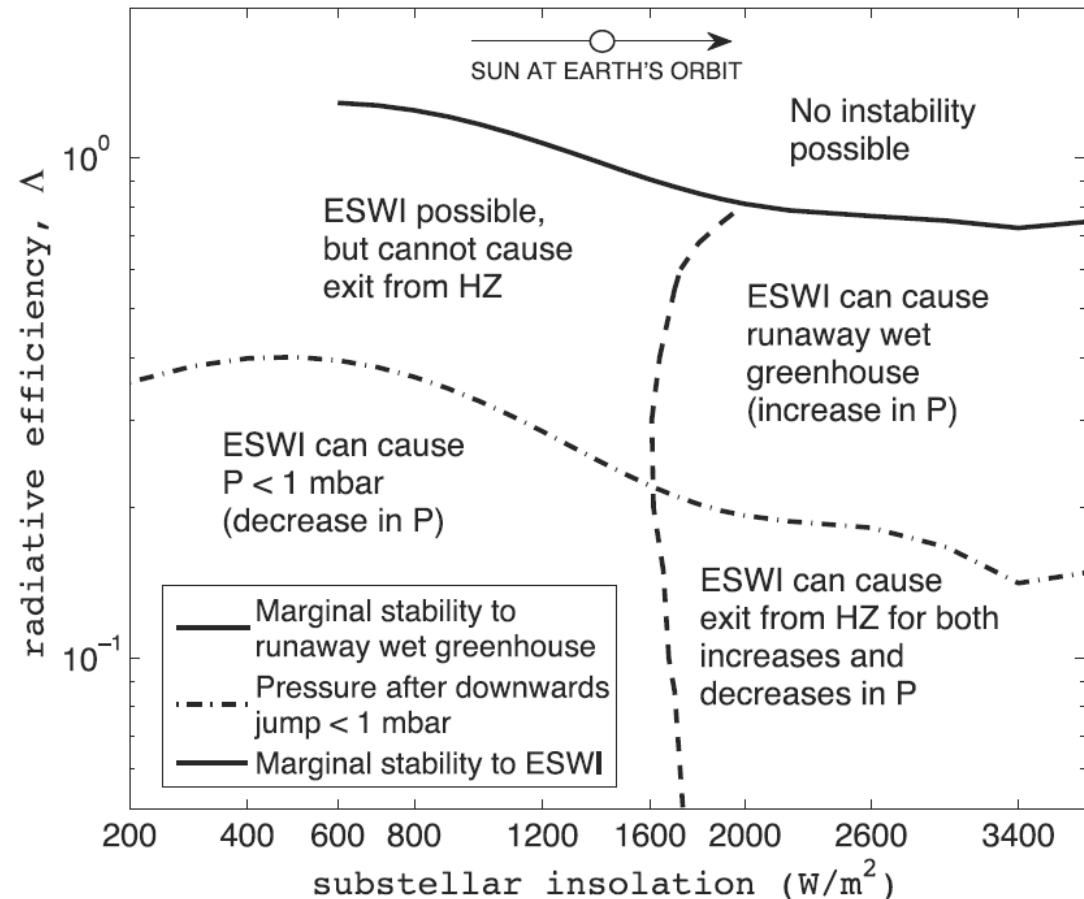
気候レジーム



- L_* の増加により低圧側ブランチの存在範囲が広がる
- Λ の増加により
 - 大気と夜半球地表面の結合が強くなり CO2 崩壊の閾値を左に動かす
 - 不安定ブランチの領域を小さくする
- ESWI による低圧側への遷移の結果として、海洋が沸騰する場合が存在

ESWI 発生条件のまとめ

- $\Lambda \leq 1$: ESWI は起こるが、気圧の変化が破局をもたらすとは限らない
 - $L_* > 2000 \text{ W/m}^2$ における圧力上昇のジャンプは暴走温室状態を起こす可能性がある(?)
- $\sim 1 \text{ mbar}$ (三重点以下) への大気崩壊は $\Lambda < 0.4$ の場合のみ発生
 - L_* の増加により不安定領域の圧力が上昇



まとめ

- EBM を用いて同期回転惑星に起こる可能性
がある気候不安定の発生条件を調べた
- ESWI はいくつかのハビタブルゾーン上にある
惑星の気候を不安定化するかもしれない
 - 大きな ΔT_s , 温室効果強制が弱い気体が主成分
である必要がある
- ESWI が多くの惑星に発生している場合, 観測
される岩石惑星の熱放射は一樣に近いか恒
星の入射との放射平衡に近いだろう

論文への批判

- パラメータ Λ を導入して、扱う気体を CO₂ 以外にも拡張しているが、どの気体でも炭素循環のようなサイクルが存在するとは限らない
- T_a 一定の仮定が常に成り立つとは限らない
 - 著者が引用した Merlis and Schneider (2010) は 1 bar の場合の結果のみ
 - 移流の時間スケールに比べて放射緩和の時間スケールが小さい場合は適当ではない
 - 乱流拡散による熱輸送が小さくなるので ESWI が起こりにくくなるのではないか?

参考文献

- 田近 (1996) 岩波講座地球惑星科学 2 地球システム科学
- Berner, R. A., & Kothavala, Z., (2001): Geocarb III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time, *Am. J. Sci.*, 301, 182.
- Walker, J. C. G., Heys, P. B. and Kasting, J. F. 1981: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of the Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 86, C10, 9776--9782
- Merlis, T. M. and T. Schneider, (2010): Atmospheric dynamics of Earth-like tidally locked aquaplanets. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2, Art. #13, 17 pp.