

Runaway Greenhouse Threshold and its Mechanisms

Yutaka ABE, A. Nitta,
A. Abe-Ouchi, R. O'ishi, and
Y. Takao¹

University of Tokyo
(present: ¹Tokyo Inst. Tech.)

地球型惑星表層の水

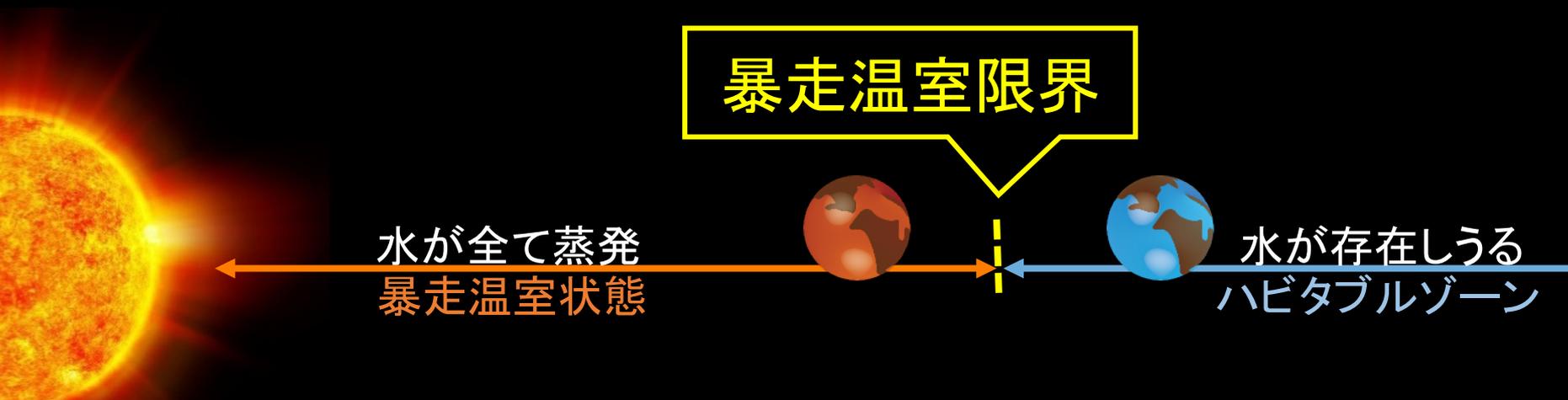
✓ 気候に大きく影響を与える

- 水蒸気の強い温室効果
- 水蒸気-液体水 間の潜熱輸送
- 降水・雲形成

[e.g. Pierrehumbert, 2010]

✓ 生命生存のための必要条件

[e.g. Kasting et al., 1993]



地球型惑星表層の水

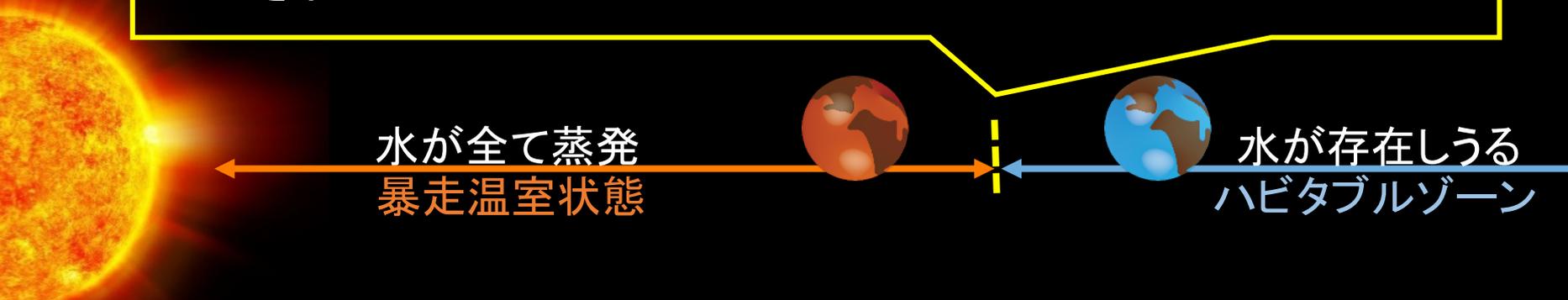
✓ 気候に大きく影響を与える

- 水蒸気の強い温室効果
- 水蒸気-液体水 間の潜熱輸送
- 降水・雲形成

[e.g. Pierrehumbert, 2010]

暴走温室限界

- ✓ 惑星が地表に水を保持できる限界となる中心星放射
- ✓ 従来は1次元の鉛直モデルを用いてメカニズムが理解されていた



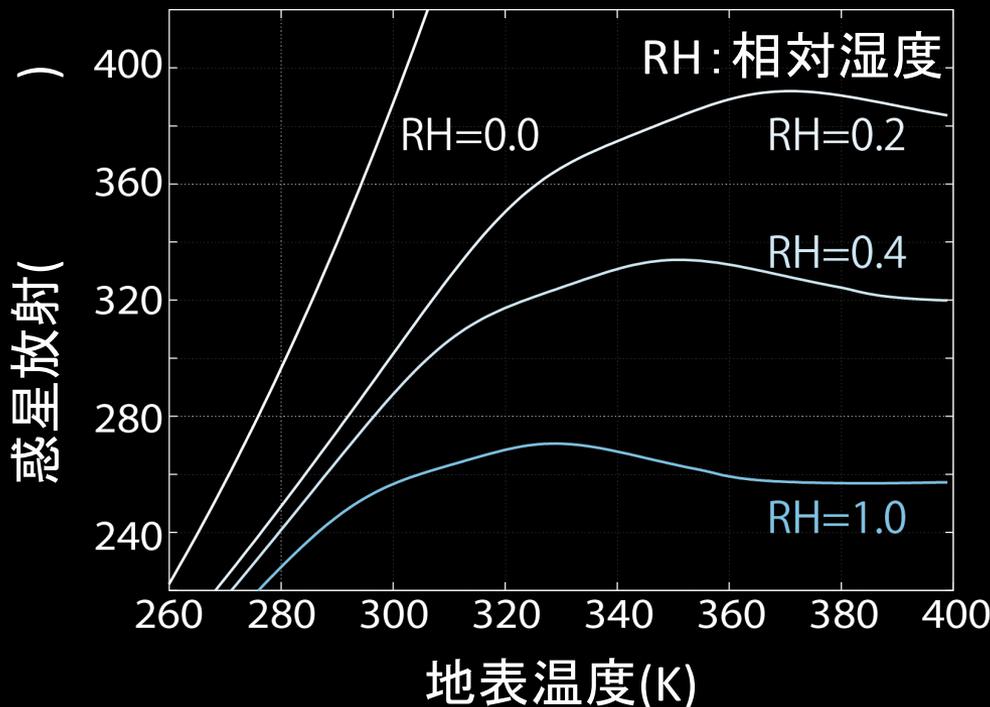
1次元モデルによる暴走温室限界の理解

✓ 大気中に水が十分供給される惑星において

惑星放射は上限値をもつ

- 水蒸気の強い温室効果に起因
- これを超える中心星放射を受け取ると、惑星は暴走状態に陥る

[Nakajima et al., 1992]



**上限値は
相対湿度に大きく依存**

3次元モデルによる暴走温室限界の計算

- 1次元モデルによる計算例:102%(/地球軌道の太陽放射) [Goldblatt et al., 2013]

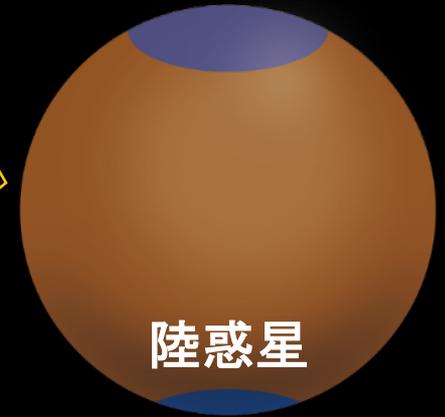


Leconte et al., 2013 etc.

- 地球と同じ地表水分布を用いて計算
- 大気循環の下降域で、乾燥した領域が形成
- ✓ 暴走温室限界:110%(/地球軌道の太陽放射)

Abe et al., 2011

- 水量が少ない地球型惑星では、
大気循環により水が局在化される
- 低緯度側が広く乾燥し、高い惑星放射が可能
- ✓ 暴走温室限界:170%

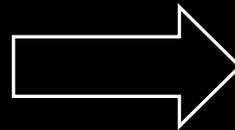


暴走温室限界は地表水分布に大きく依存することを示唆

[Abe et al., 2011; Takao, 2013, 修士論文]

本研究の目的

- ✓ 大気大循環モデルを用いて**暴走温室限界**の地表面水分布依存性を明らかにする.



実験1: **緯度方向**の水分布

実験2: **経度方向**の水分布

実験3: **2次元**の水分布

- ✓ 水を持つ惑星の**暴走温室状態**に陥る**メカニズム**について議論する.

GCM(大気大循環モデル)概説

CCSR/NIES AGCM5.4g を使用

- ✓ 大気状態(1気圧・空気), 自転速度は地球と同じ
- ✓ 離心率 $e=0$, 自転軸傾斜 $\phi=0$, 地形・オゾンなし
- ✓ 地面熱容量一定(砂漠), 地表面アルベド $=0.3$

CCSR/NIES AGCM5.4g

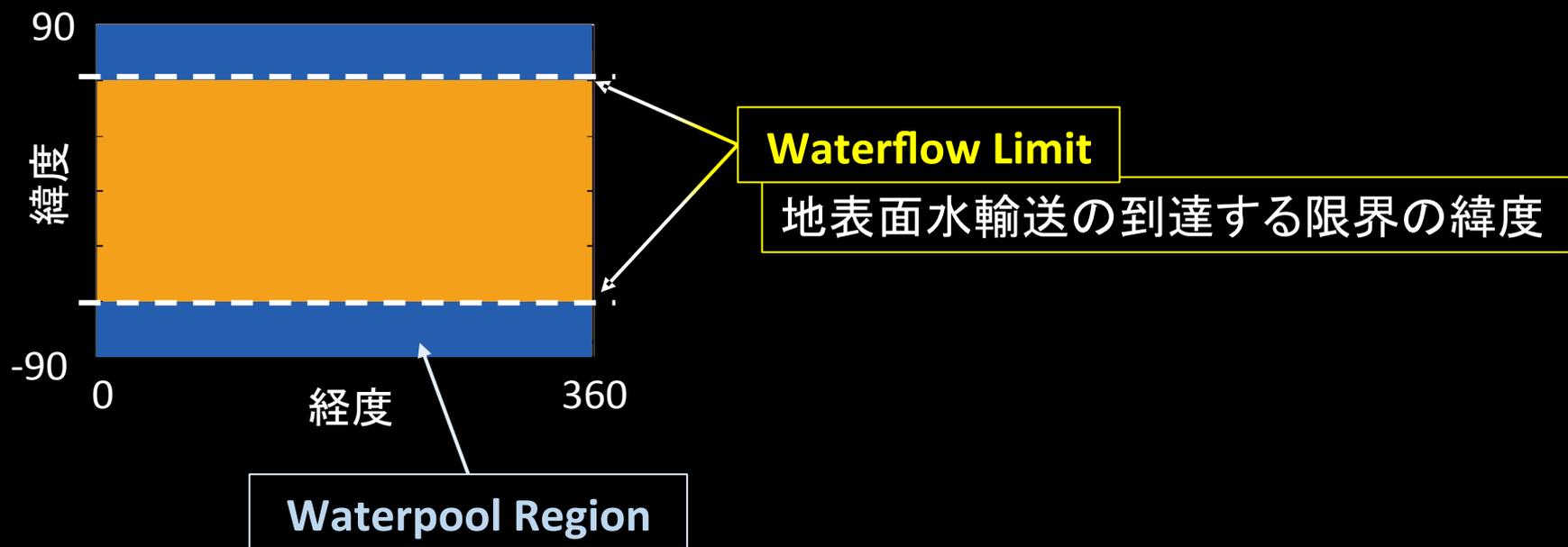
分解能：

- 水平格子点32(lat)×64(lon)個(5.6度間隔, T21)
- 鉛直層:20層(σ 系)

計算過程：

- 全球プリミティブ方程式系
- 物理プロセス:
 - 放射伝達: 2流近似したk分布法[Nakajima and Tanaka, 1986] 18チャネル
 - 積雲対流: Arakawa and Shubert, 1974
 - 大規模凝結: Le Treut and Li, 1991

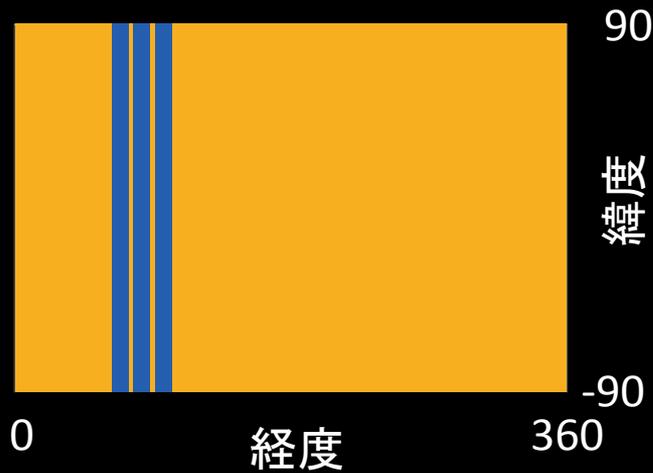
実験1: 緯度方向の水分布vs暴走温室限界



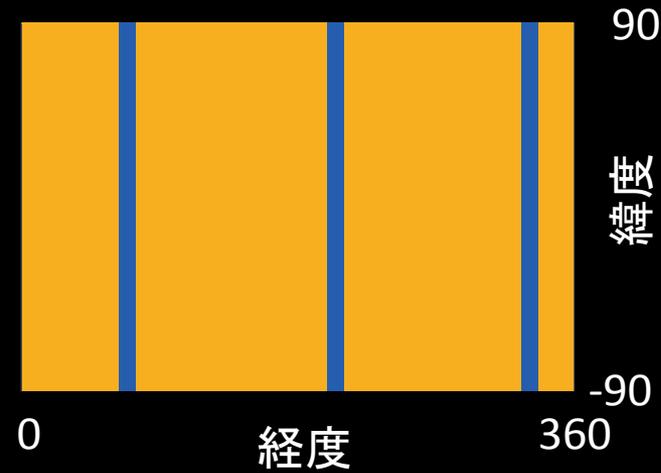
- ✓ **Waterflow Limit**をパラメータとして
経度方向に一様な地表面水輸送を表現

実験2: 経度方向の水分布

Waterpool Region分布



分布が集中



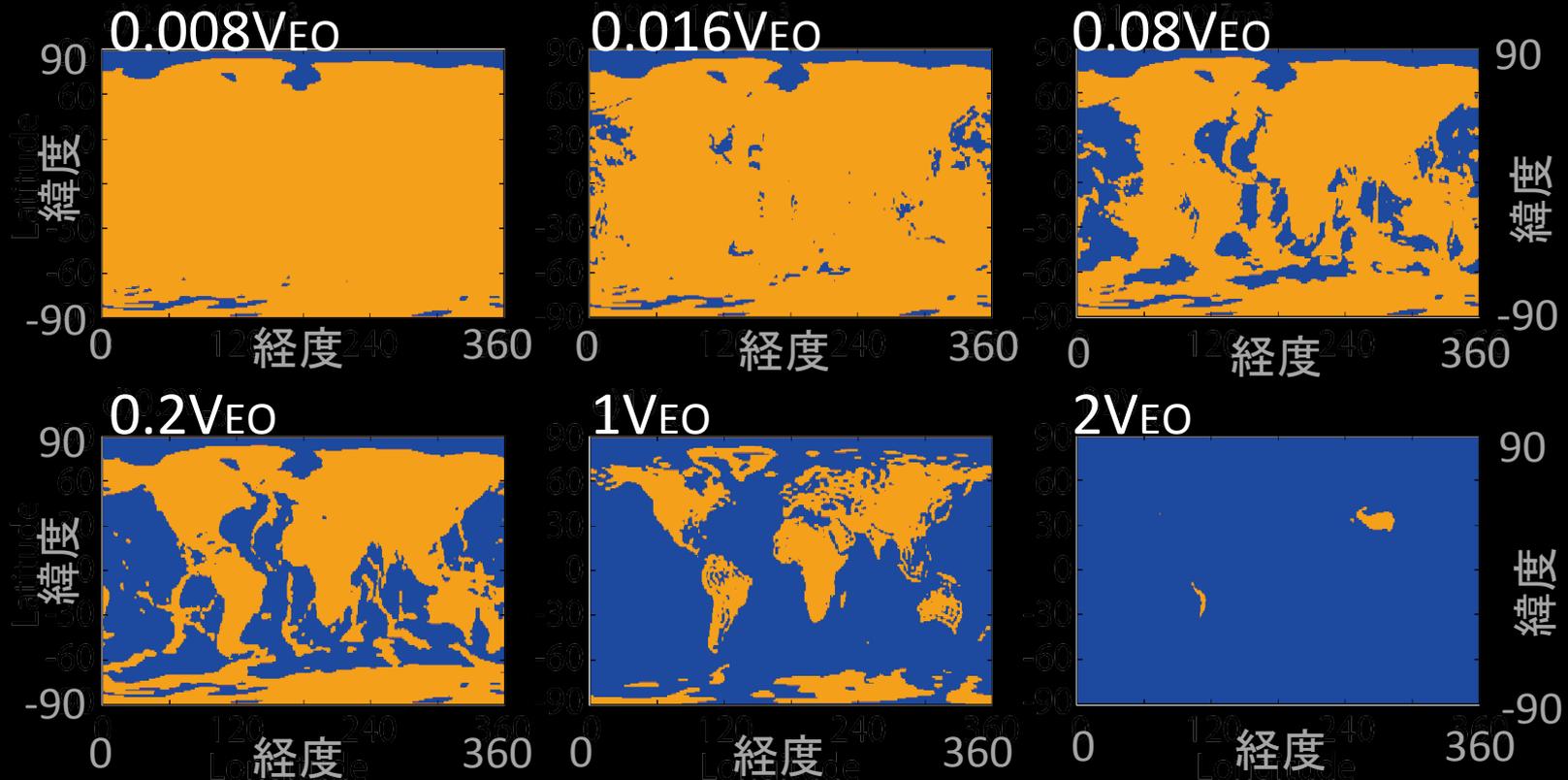
分布が均等に分散

- ✓ 同じWaterpool Region面積でも暴走温室限界は異なる??

実験3: 二次元の水分布依存性

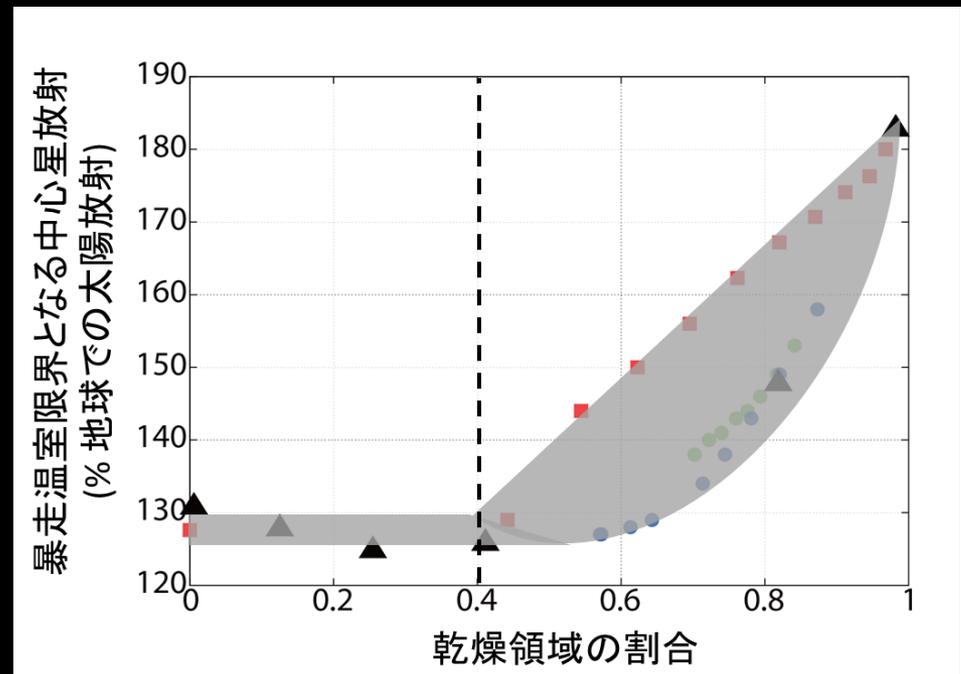
✓ 地形を地球に固定

→ 地表面水輸送は水量のみに依存



$$1V_{EO} = 1.37 \times 10^{18} \text{ m}^3$$

水分分布依存性の まとめ

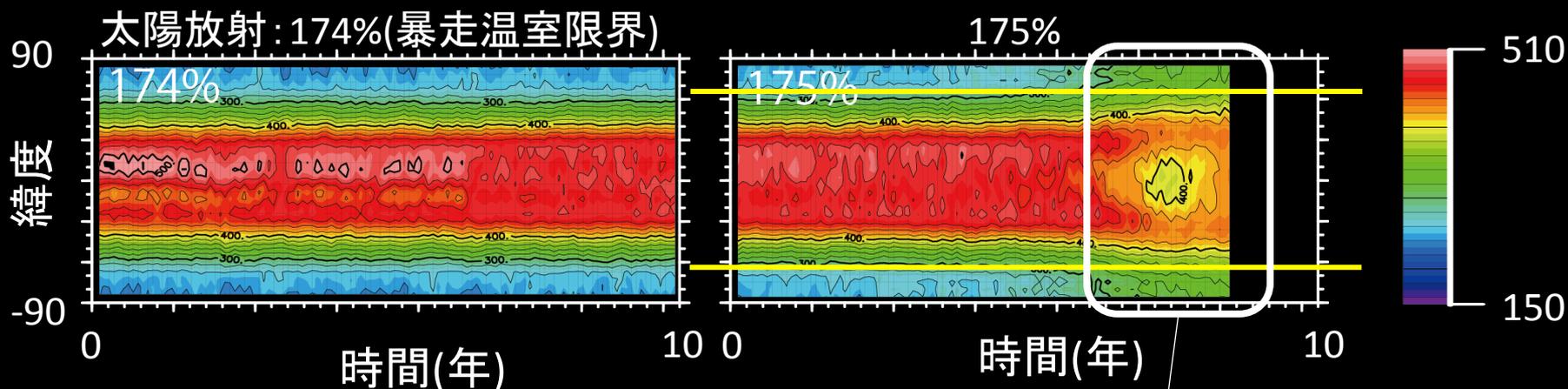


- 水分分布によって
暴走温室限界は連続的に大きく変化
- 暴走温室限界がほぼ一定の領域の広さは
ハドレー循環で覆われる面積で決まる

陸惑星の特徴：惑星放射の時間変化

✓陸惑星の暴走するメカニズムは??

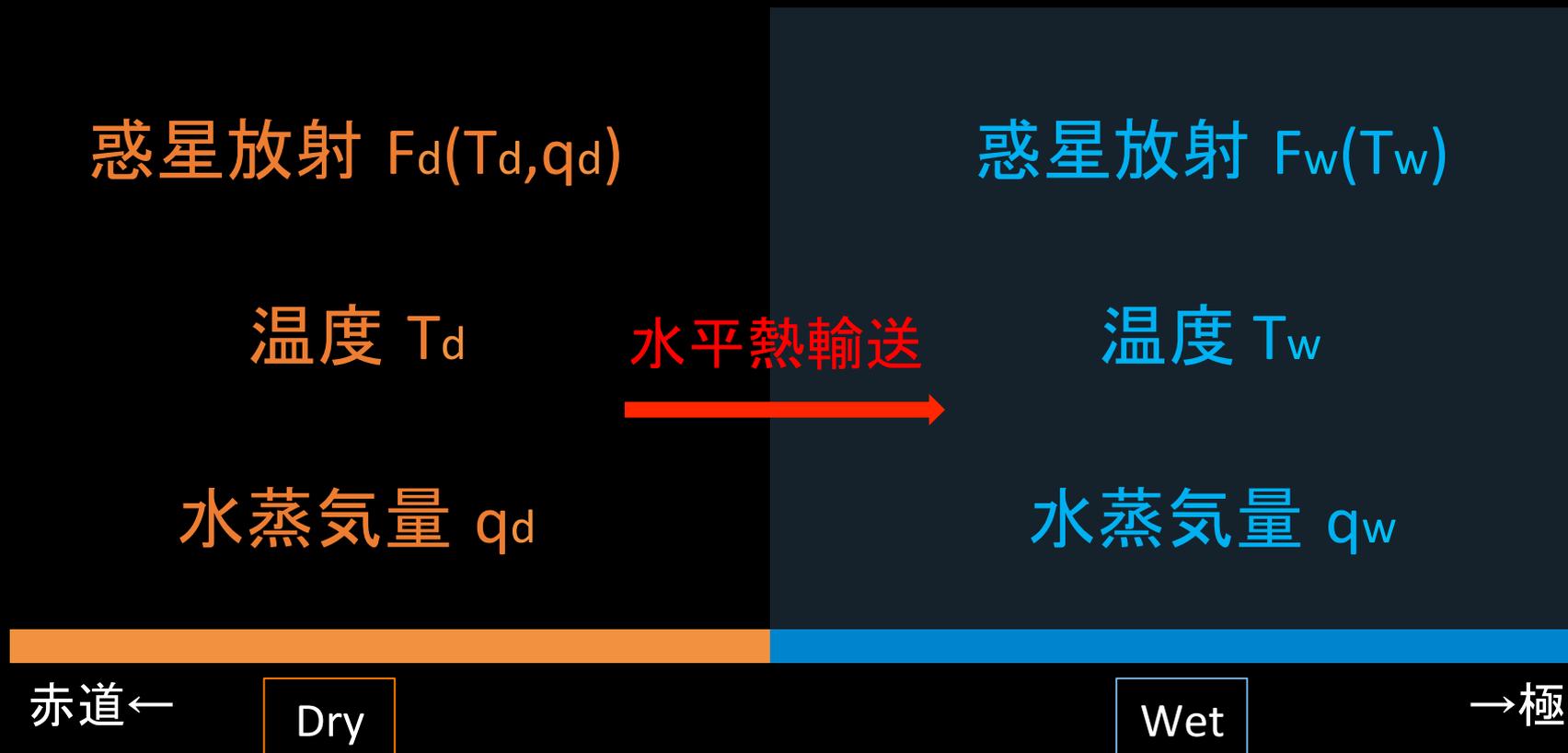
惑星放射[]の時間変化(Waterflow Limit：69度)



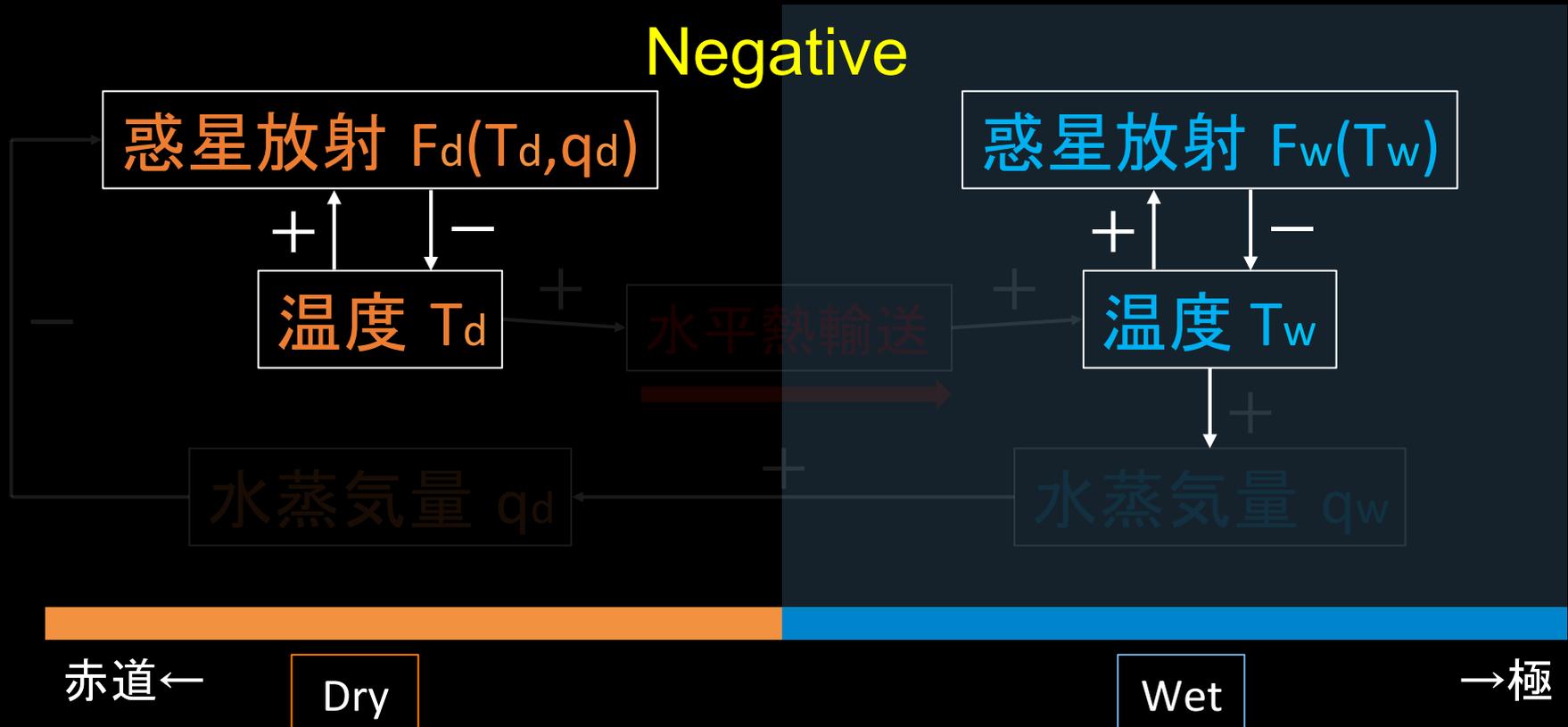
低緯度で惑星放射の減少
高緯度で惑星放射の増加

従来の理解とは異なる暴走温室のメカニズムが存在??

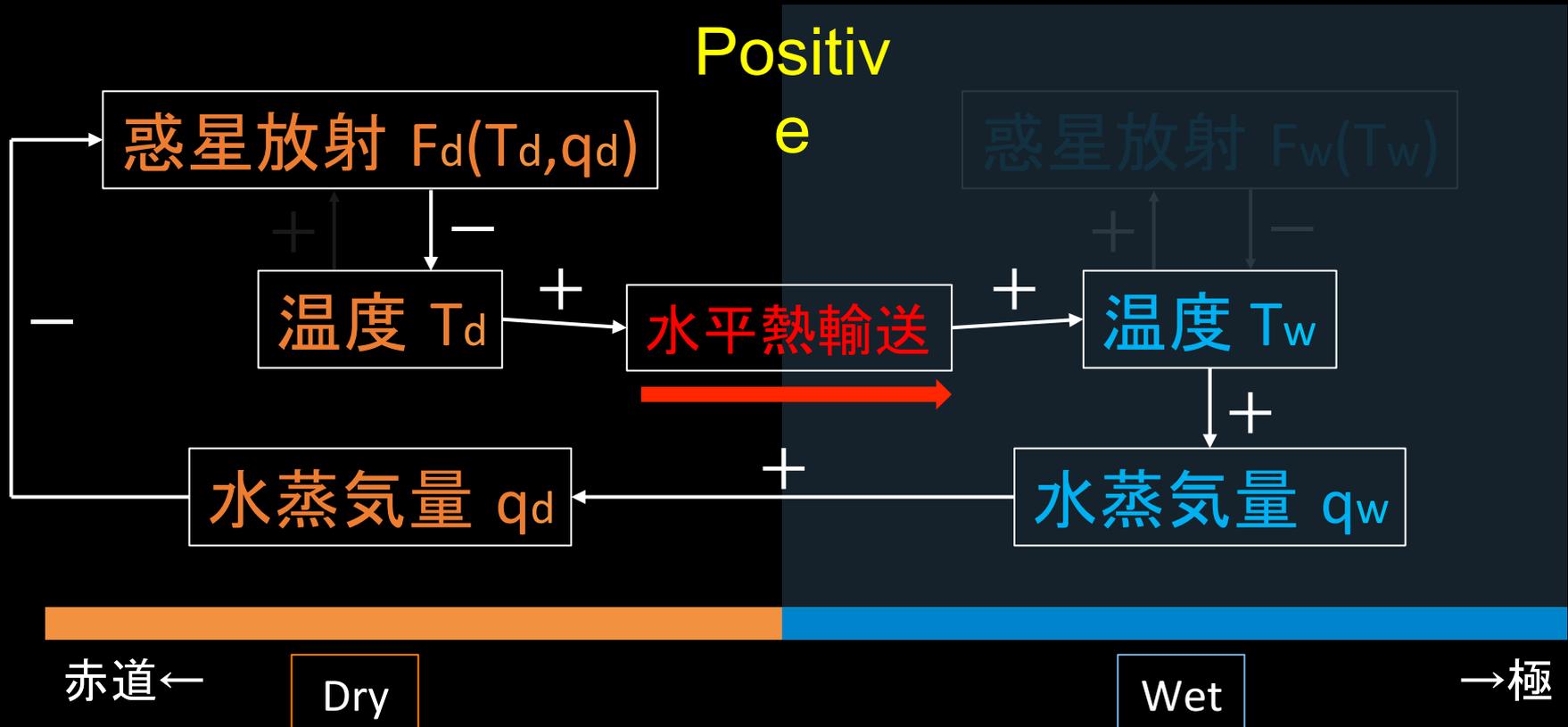
陸惑星の模式図



従来考えられていたフィードバック



水平熱輸送のフィードバック



乾燥領域において、水蒸気量の上昇によって惑星放射が低下

まとめ

暴走温室限界の地表水分布依存性

暴走温室限界は地表水分布によって連続的に大きく変化

- ✓ 2次元の地表水分布によって変化する暴走温室限界の範囲は、緯度・経度それぞれの方向の水分布依存性で囲まれる範囲に一致する。
- ✓ 乾燥領域の面積が4割以下になると、水分布によらず暴走温室限界は一定
 - **ハドレー循環の幅**で決まる→自転周期が特に重要
- ✓ 水の存在可能領域(ハビタブルゾーン)の内側境界は、**水分布に依存して大きな幅を持つ**

暴走温室状態に至るメカニズム

従来の理解とは異なる暴走温室メカニズムの存在を示唆

- ✓ 陸惑星の暴走メカニズム
 - **水平熱輸送に係る正のフィードバックの存在**を示す
 - 惑星放射が**上限値に到達する前に暴走**
- ✓ 海惑星の暴走メカニズム
 - 地面の熱容量に依存して、雲の影響が大きく変化