

惑星大気モデリング ～ 探査・系外惑星をにらんで

高橋芳幸(神戸大学)



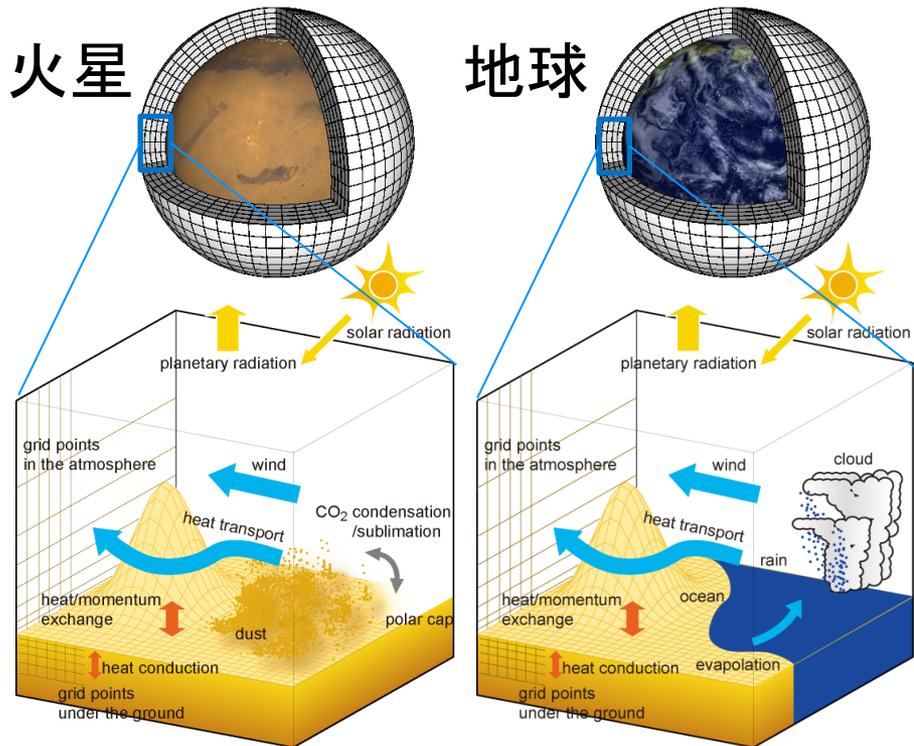
惑星大気モデリングの歴史

- 数値モデルを用いた惑星大気の研究は、惑星大気探査と並行して、地球大気研究と同程度に古くから行われてきた。
 - 初めての火星探査の試みは 1960 年代。
 - Marsnik by ソビエト, Mariner by 米国
 - 火星大気の大循環計算は、1960 年代には始められていた (e.g., Leovy and Mintz, 1969).
- 現在では様々な惑星を対象として、多数の研究グループで実施。
 - 火星, 金星, タイタン, 木星型惑星, 系外惑星?
 - グループ数
 - 火星: ~10 (国内でも ~3; 黒田, 小郷原, GFD 電脳倶楽部)
 - 金星: ~5? (国内にも ~2; 山本, 松田, 高木)
 - その他: ~2, 3?

目次

- 惑星大気モデリングの歴史
- 惑星大気モデルの概要
 - 火星の結果
- 系外惑星（・惑星古気候）
- 惑星大気モデルと探査
 - 環境評価
 - データ同化
- 惑星大気モデルが直面する困難

惑星大気モデル概要



- 本質的には地球大気モデルと同様
- 構成
 - 力学過程
 - 物理過程
 - 放射過程
 - 乱流混合過程
 - 重力波抵抗
 - 凝結過程
 - 地表面過程
- 近年では大気海洋結合モデルの応用例もある。

惑星大気モデルの概要: 力学過程

- 地球型惑星を扱う場合
 - 地球大気モデルとほぼ同じ
 - 支配方程式系
 - 大循環モデル: (概ね)プリミティブ方程式系
 - 領域モデル: 完全圧縮系, 準圧縮系, 非弾性系
- 木星型惑星の厚い大気層を扱う場合
 - 惑星半径に比べて無視できない大気の厚さを考慮して定式
 - 浅い大気の近似をしない
- ただし, 状況によっては非理想気体を想定
 - 例: 金星大気(火星大気においても非理想気体であることに意味があるとの話もある)

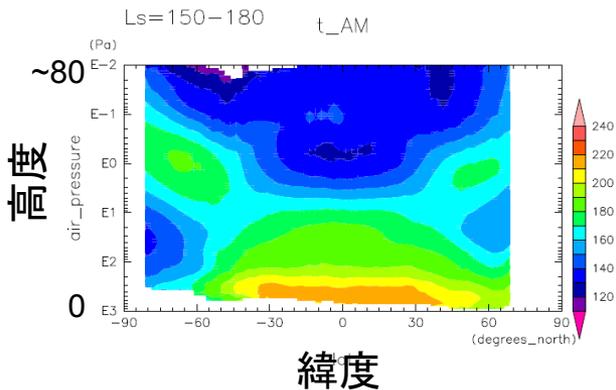
惑星大気モデルの概要: 物理過程

- 特に, 放射過程, 物質循環に関わる過程が地球大気モデルとは異なる
- 放射過程
 - 元となる放射伝達方程式は普遍的
 - 考慮すべき物質の種類と量が地球大気とは異なるため, 用いる吸収・散乱物質の光学パラメータは, 通常, 個々の惑星用に用意
- 物質循環過程
 - 各惑星において重要な物質に関わる過程を導入
 - 例:
 - 火星: ダスト, CO_2 , 水
 - 金星: H_2SO_4 , ?

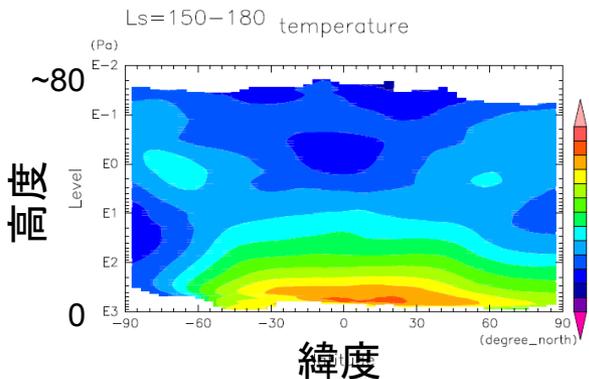
惑星大気モデルによる計算例

火星大気の例(北半球の秋の温度)

観測

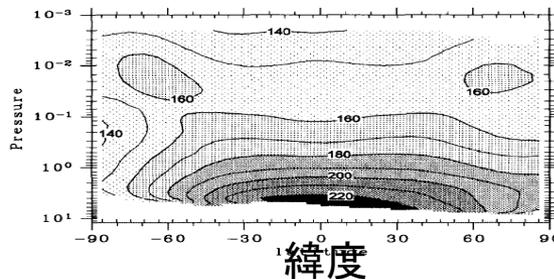


モデル

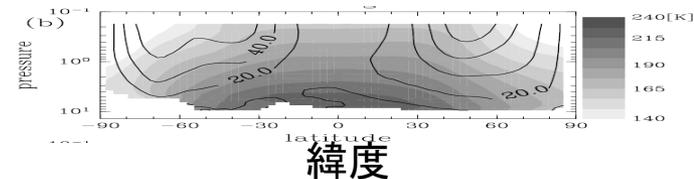


地球流体電脳倶楽部 惑星大気
大循環モデル, DCPAM

- 概ね地球大気モデルに火星パラメータを用いて計算
 - 場合によって放射モデルは火星用に置き換え
 - ダスト分布は観測に基づいて与える.
- 現在の火星大気大循環モデルは, 観測される温度分布の特徴のいくつかを表現
 - 良くチューニングされたモデルでは, バイアスは ~10 K 程度(?)
 - 中層大気の表現は簡単ではない.



(Kuroda et al., 2005)



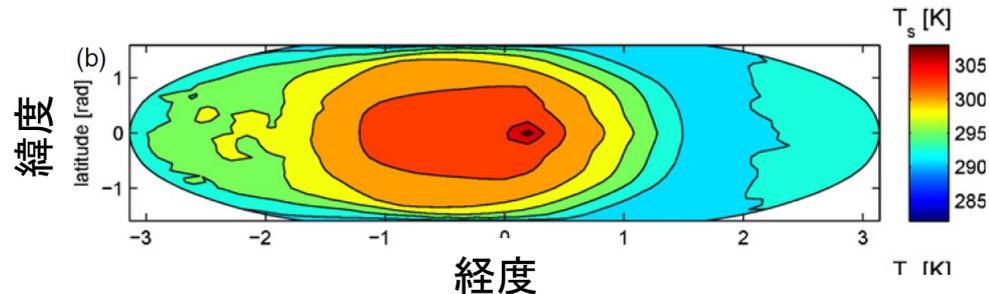
(Ogohara and Satomura, 2008)

惑星大気モデルを用いた 系外惑星大気の研究

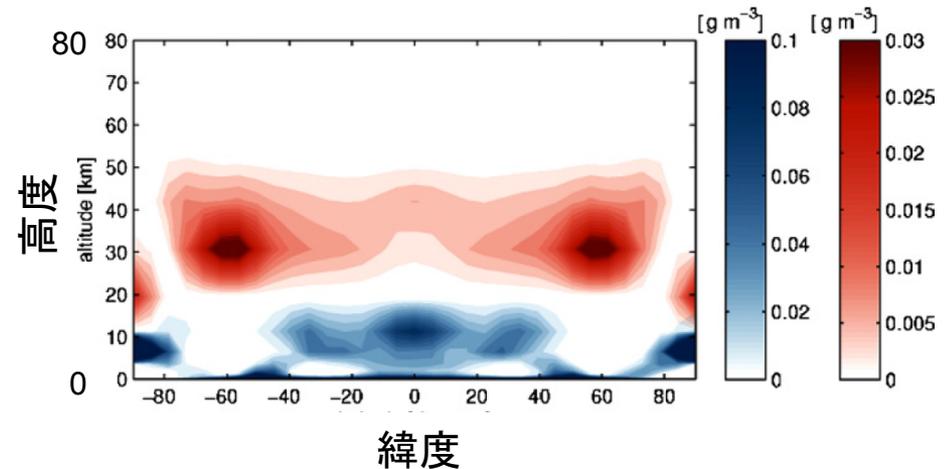
- 数値モデルを用いて系外惑星の気候や循環構造の多様性を調べる研究が行なわれるようになってきた.
- 例えば, 大気大循環モデルを用いて, 系外惑星 Gliese 581 d における水の存在可能性が議論されている (Wordsworth et al., 2011).
 - Gliese 581 d は, 太陽から ~20 光年の距離にあり, 表面温度 ~3500 K の恒星 Gliese 581 を公転する惑星の一つ.
 - ただし, 新しい観測によると Gliese 581 d は誤検出である可能性が指摘されている.
- 従来, 鉛直 1 次元モデルを用いて調べられてきたが, 大循環モデルを用いて, 空間非一様性を含めて調査.

系外惑星 Gliese 581 d の計算

- 大気大循環モデルを用いて下の条件で計算
 - 大気組成
 - 主成分: CO_2
 - 微量成分: H_2O
 - 大気量
 - 5-30 bar
 - 右図は 20 bar の場合
 - 潮汐固定された条件を仮定
- 安定な大気と表面における液体の水を保持できる可能性が示された。
 - CO_2 による温室効果
 - 地球よりも定性的にはレイリー散乱の寄与が小さい
 - 中心星からの放射の波長が太陽に比べて長い



惑星表面温度分布



年平均・東西平均雲分布, H_2O (青), CO_2 (赤)

(Wordsworth et al., 2011)

惑星大気モデルと探査計画

- 惑星大気モデルは, 大気のある惑星の探査においても有益な道具となっている.
- ここでは, 下の二つを紹介.
 - 日本による次期火星着陸探査の検討に向けたモデルの利用
 - 火星大気観測データを用いたデータ同化

火星探査機設計に向けた惑星大気モデルを用いた環境評価

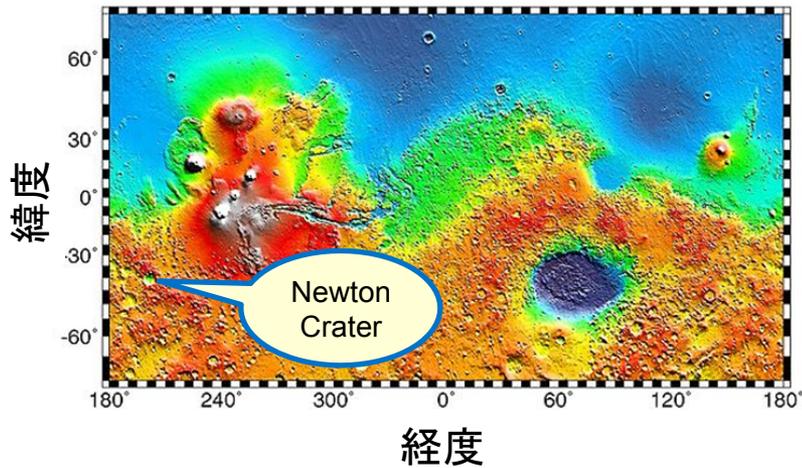
- JAXA を中心に 2020 年代の火星着陸探査を検討中。
 - 着陸技術の実証, 生命探査? 年代学探査?
- 着陸探査機の設計・運用のために表層環境の情報が必要。
 - 探査機の熱収支
 - 太陽電池のサイズと発電量
 - 着陸時・軌道投入時のリスク
- 下の三つのモデルを用いて表層環境データを提供。
 - 火星大気大循環モデル
 - 地球流体電脳倶楽部 惑星大気大循環モデル, DCPAM
 - 領域モデル
 - CReSS を基に火星の放射モデルを導入(杉山他, 本講演会 惑星大気セッション)
 - LES モデル
 - SCALE-LES を火星条件で使用(西澤他, 2013 年気象学会秋季大会等)

(詳細は, 小高他, 本講演会)

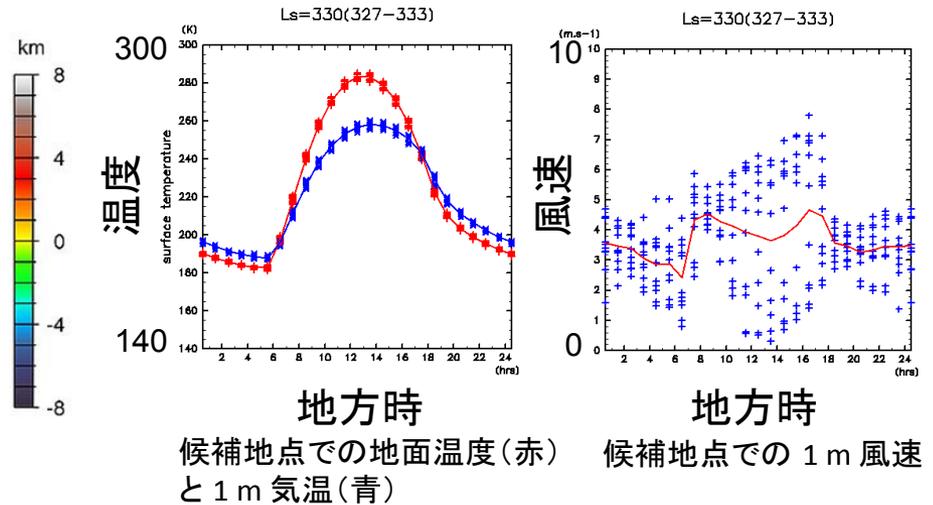


モデルを用いた火星着陸候補地点の 表層環境評価

大循環モデルを用いた評価



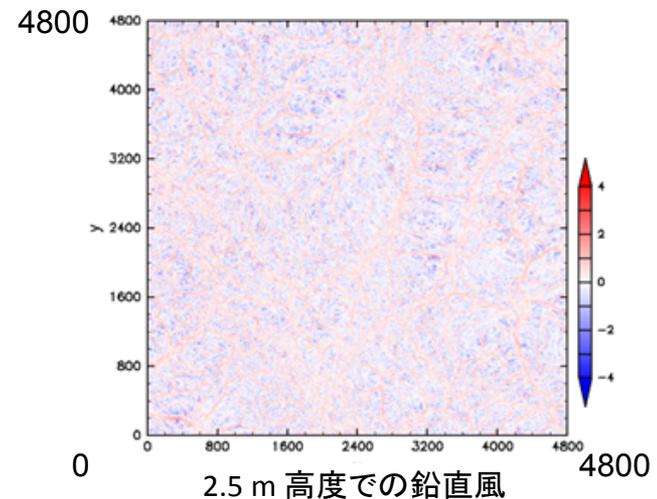
着陸候補地点での秋の温度と風速



LES による評価

現状は、火星条件での一般的な対流運動の寄与を評価.

- 特定の地域が対象ではない.

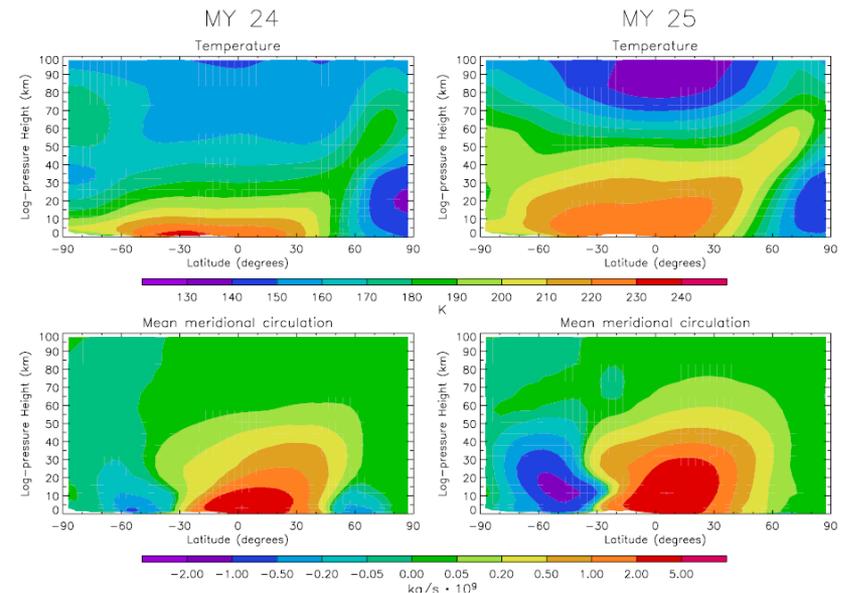


火星大気のデータ同化

- 火星大気に関しては,
 - (比較的)観測データが豊富,
 - モデルが観測される大気構造のいくつかの特徴を表現.
- 欧米の火星(惑星)大気探査の観測データを用いて同化実験が行われている.
 - Oxford Univ. / Open Univ. (UK) / LMD (France)
 - Caltech (US)
 - Maryland Univ. (US)

Oxford Univ./Open Univ./LMD グループによる火星大気データ同化

- Mars Global Surveyor による温度、ダスト量観測を Analysis Correction Scheme (Lorenz et al., 1991) を用いて同化。
 - 大気波動やダストストームの研究に利用 (e.g., Montabone et al., 2005)



データ同化で生成された温度(上)と質量流線関数(下)(Montabone et al., 2005)

惑星大気モデルが直面する困難

- 火星のダストストームの年々変動の再現
- 金星のスーパーローテーションの再現
- 金星の大気大循環の力学的表現の不確定性
- ...

金星大気計算における困難 前置き

- 金星の大気大循環は、すべての緯度で自転方向に吹く東西風，スーパーローテーションで特徴づけられる。
- しかし，そのメカニズムはわかっていない。

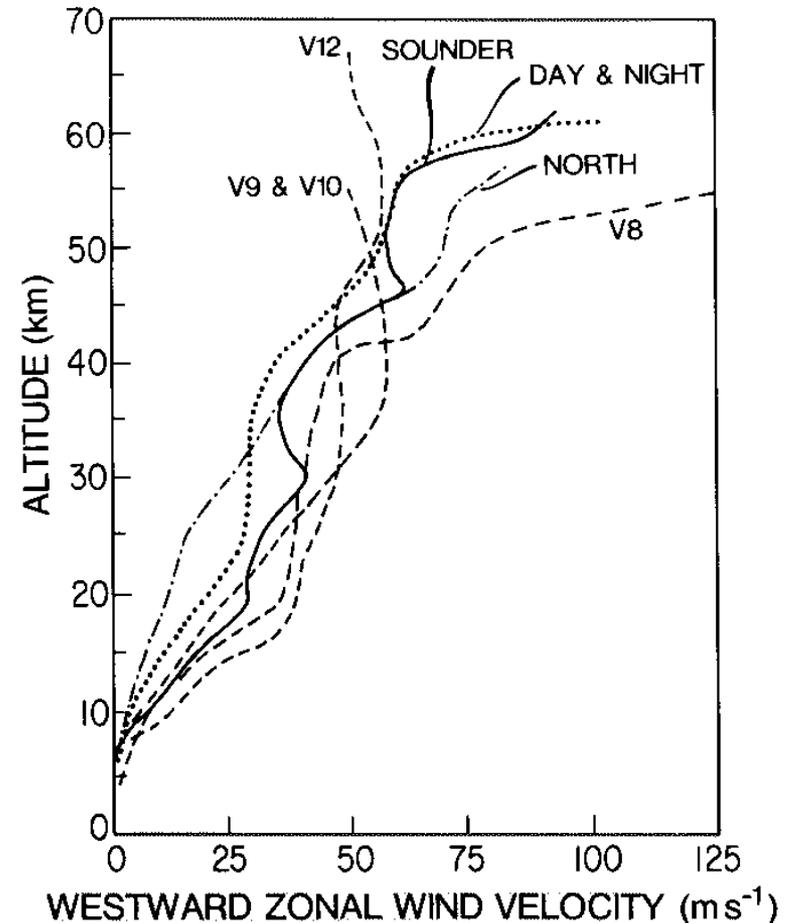
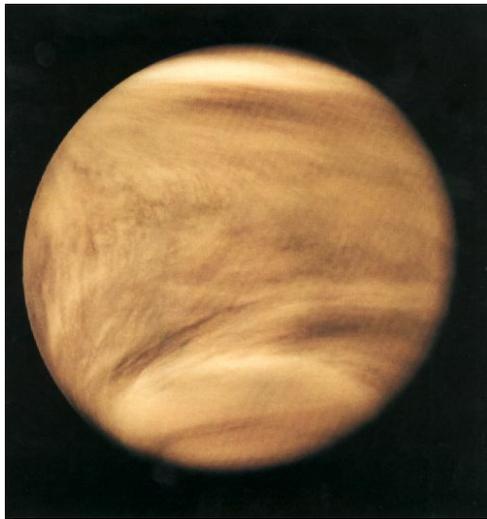
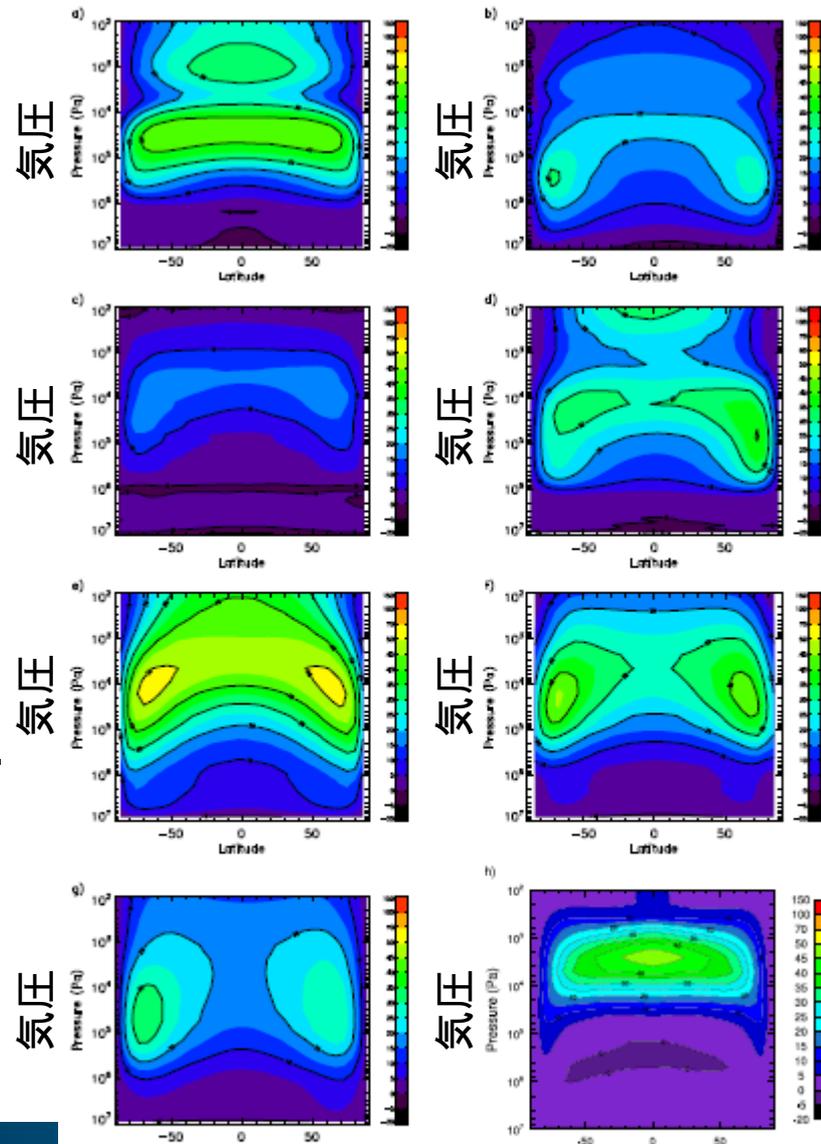


Fig. 9. Vertical profiles of east-to-west wind speed from Doppler tracking of Veneras 8, 9, 10, and 12 (V8, V9, V10, V12) and interferometric tracking of Pioneer Venus probes (from Schubert et al. 1980a).

Schubert, 1983: in Venus, Arizona Press, 684, Fig. 9.

金星大気計算における困難

- 金星相互比較実験
 - 様々なモデルを用いて, 似たような条件で実験
 - 同じニュートン冷却
 - 加熱分布を与える
 - 得られる金星スーパーローテーションの構造はモデルによって大きく異なる。



(Lebonnois et al., 2013)

Fig. 2 Zonal wind fields of Venus. The left column is spectral models: (a) and (b) are spectral models; (c) and (d) are GCMs; (e) and (f) are GCMs; (g) and (h) are GCMs. The right column is GCMs: (c) and (d) are GCMs; (e) and (f) are GCMs; (g) and (h) are GCMs. The unit is m/s.



まとめ

- 様々な惑星の気候, 大気循環を調べるために数値モデルが開発されてきた.
 - いくつかの例では, 惑星大気の特徴のいくつかを表現することに成功し, 太陽系内の現在の惑星大気だけでなく, 惑星の古気候や, 系外惑星大気についても新たな知見をもたらしてきた.
- しかし, 火星の惑星規模ダストストームや金星スーパーローテーションなど, 惑星大気モデリングが直面する問題は多く残されている. また, 系外惑星大気研究は, 様々な仮定に基づいている.
- これらの解決には, 結局のところ観測の充実が欠かせない. あるいは, 計算機能力を生かした高解像度計算が新しい展望を開く可能性はあるかもしれない.