

ハビタブル惑星大気の 数値的研究の 一つの戦略

林 祥介

shosuke@gfd-dennou.org

神戸大学 大学院理学研究科

地球惑星科学専攻・惑星科学研究センター

地球流体電脳倶楽部

2009年8月18日 国立天文台
ハビタブル惑星ミニワークショップ



気象・気候予測 (伝統芸能)



気象予報・気候予測の惑星科学的野心

- あたえられた任意の条件下にある惑星の表層環境の可能な様相を語れるようになること
 - どういう条件がそろえば「地球」っぽくなるのか？
 - 液体の水の存在する惑星
 - 火星になったり金星になったりするのはいったい
うときか？（暴走温室・暴走凝結）
 - ...

気象予報・気候予測の惑星科学的野心

- 温暖化予測で必要だったと同様に循環を陽に解くモデルが必要、かもしれない
 - 物質を決めれば、おおよその構造は熱力学と放射で決まる
 - 物質の循環を決める必要があるとすると...

気象・気候の予測における基本的作戦

天気・気候の再現と予測

- もっとも簡単（？）部分＝連続体力学の積分
 - 流体力学（流れ場）
 - 連続の式
 - 運動方程式（構成方程式）
 - 物質の保存則（輸送）
 - 熱力学（熱的構造）
 - 熱の式（熱の生成が与えられておれば）

気象・気候の予測における基本的作戦

天気・気候の再現と予測

- 比較的簡単（？）部分＝束ねると大変
 - 放射伝達
 - 相変化・化学反応
 - 粒子成長（凝結・雲粒・雨粒・エアロゾル）
 - 降水（流体運動と粒子運動の分離）

気象・気候の予測における基本的作戦

天気・気候の再現と予測

- 簡単でない（どろくさい）部分＝原理的には物理法則の積分のはずだが...
 - 地表面・地中の水
- さらに簡単でない部分
 - 生態系
 - 社会経済系

気象・気候の予測における基本的作戦

天気・気候の再現と予測

- などなどとならべるととてもできそうにない
 - いかな計算機を使おうと、物理法則の直接適応による計算が必要とする自由度に比べれば、所詮小さな自由度しかない
 - やみくもに基礎方程式を離散化して積分してもうまくいかない
- 基本的にむちゃなことをやる

気象・気候の予測における現実

それなりに数値計算できるゆえんは

- 自然界の構造をある程度知っているから

- 数理物理的構造

- なぜそうなるかを知ることのひとつ

- 計算の勘所を与える＝そこさえ表現できればおおむね良い

- 観測＝答えを見ちゃうこと

- なぜそうなるかを知らなくても表現するべきものがわかる

- 答を知らないとどう計算していいかわからない

気象・気候の予測における現実

それなりに数値計算できるようにする

- モデル開発（大工仕事）

- 資源の割り振り

- 自然界の構造を頼りに、有限の自由度（計算資源）に対し、何をどの程度表現（計算）するのかを割り振ること
- 表現したいものの構造を良く知らないとは設計できない

- 限界

- 基礎方程式が同じだからといって違う状況でうまく計算できるとは限らない

気象・気候の予測における現実

予言力を高めるためには

- 自然界の構造を掌握していると予測能力が高まる
 - 構造を知る努力
- 現在の惑星環境を表現できることは予測能力のチェックポイント
 - 何をどの程度再現できればいいのかは自明じゃないけど

気象・気候の予測における現実

結局、他の数理物理な世界と同じ手順で
ことを行っているつもりなんだが、精
度の高い記述を行っている人々から見
るとかなり強引かも

- こんな精度の低いモデルで地球環境変化を議論
していいのか？
- 従事しているプロは、計算の勘所をはずしてな
いつもりなので、それなりに自信がある（らし
い）
 - シロートには、計算が勘所をはずしているかいない
か判断できないので批判が難しい

地球流体力学的基本問題

- 一番簡単な部分であるはずの流体運動でも乱流は扱いがやっかい
 - ただでさえ厄介
 - 非一様非等方場(密度成層構造や一般流がある)のでさらに厄介
 - 凝結性成分があって潜熱があるとなおさら厄介



地球流体力学的基本問題(1)

乱流（波）散逸構造：運動量，物質供給・輸送
・混合の詳細を支配

- いわゆる乱流のクロージャー問題

- 表現できないサイズの運動の寄与をどう見積もるか

- 大気では

- 非一様場なので渦は波になる（等方乱流でない）
- 凝結性物質の輸送と混合が凝結過熱を介して大きな非線形を生む

- 通常の乱流クロージャとは区別して積雲パラメタリゼーションという

- 地表面から供給される物質（水蒸気・ダスト）

- 地表面風速の詳細に依存

地球流体力学的基本問題(2)

乱流（波）散逸構造：大気大循環の平均的様相を支配

- 水平対流しない（南北温度差があっても対流しない）
 - 回転系（自転する系）にあるのでコリオリ力とつりあう地衡風平衡（温度風平衡）にある
- 水平対流するためには、**地衡風平衡を壊す**要因
 - 近接作用：乱流による運動量輸送（摩擦）
 - 遠隔作用：波による運動量輸送

地衡風平衡：浅いモデルvs深いモデル

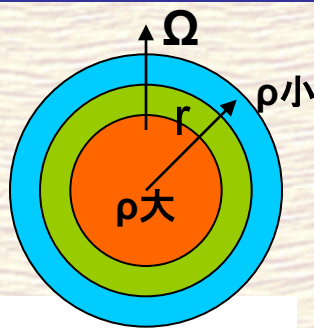
- 惑星大気運動をとらえる二つの伝統
 - 浅いモデル：地球型惑星大気
 - 大気層は惑星半径に比べて非常に薄い
 - 球面にへばりついた準二次元的運動
 - 深いモデル：回転球殻内の対流運動
 - 大気（流体）層は惑星半径の数分の一程度
 - 自転軸に平行なテイラー柱型の準二次元的運動

地衡風平衡：浅いモデル

- 浅いモデルの力学：強い成層構造

- 「鉛直」方向に静水圧平衡

- コリオリカは「水平」方向だけが働く



$$\frac{\partial v}{\partial t} + (2\Omega + \nabla \times v) \times v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi + \tilde{\nu} \nabla^2 v$$

$$2\Omega \times v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi$$

$$\begin{aligned} -2\Omega \sin \phi v &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda} \\ 2\Omega \sin \phi u &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\partial \Phi}{\partial r} \end{aligned}$$

地衡風平衡：浅いモデル

- ちなみに温度風：地衡風平衡を鉛直に眺める

$$-\sin \phi v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta p}{\partial x},$$

$$\sin \phi u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta p}{\partial y}$$

$$\sin \phi \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_p, \quad \sin \phi \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)_p$$

$$\sin \phi \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p, \quad \sin \phi \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p$$

地衡風平衡:地球の場合

東西流 (ジェット気流)

- 中緯度対流圏上部と高緯度成層圏の強い東西風のことをジェットと言う
- 回転系 (自転する系) にあるのでコリオリ力とつりあう地衡風平衡 (温度風平衡) にある

南北風 (子午面循環)

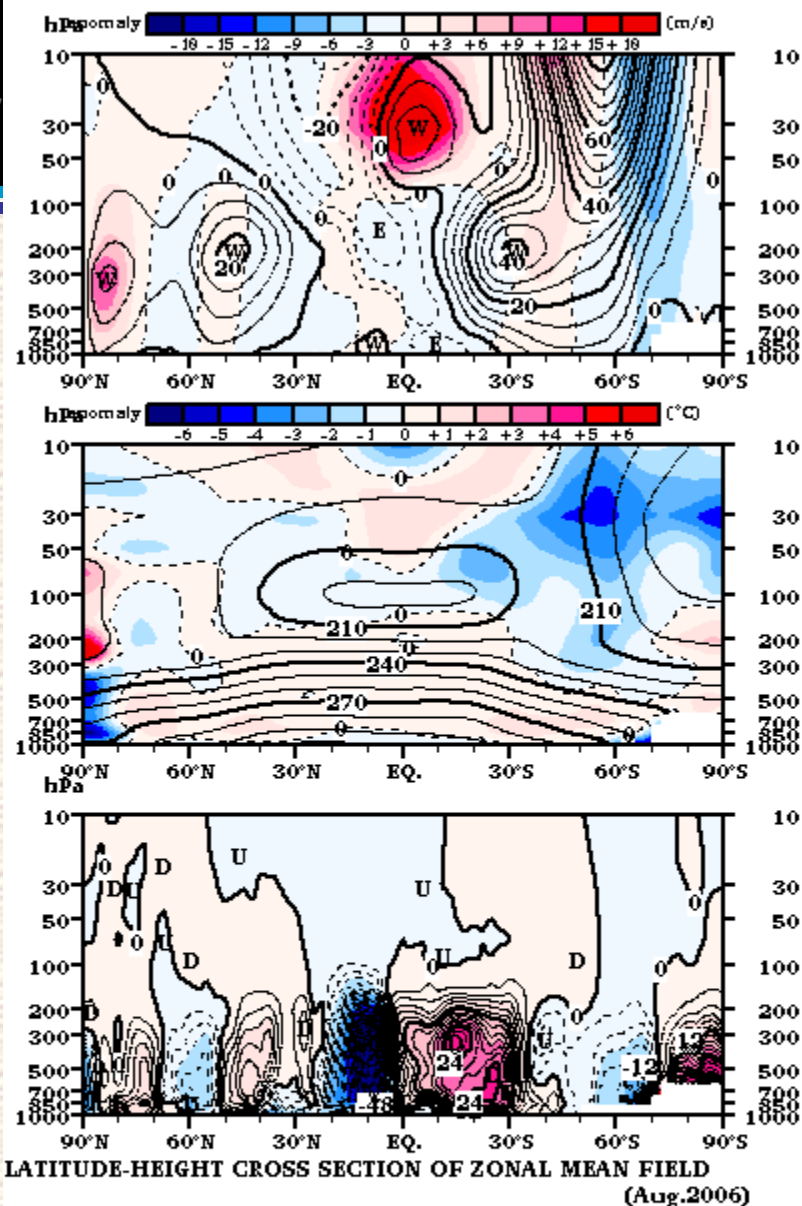
- 地衡風平衡の崩れがあつてはじめて南北に運動する

2006年8月月平均東西平均場

気象庁気象統計情報

<http://www.data.kishou.go.jp/climate/diag/past/2>

00608/extratropical/zonal/zonal.html



LATITUDE-HEIGHT CROSS SECTION OF ZONAL MEAN FIELD (Aug.2006)

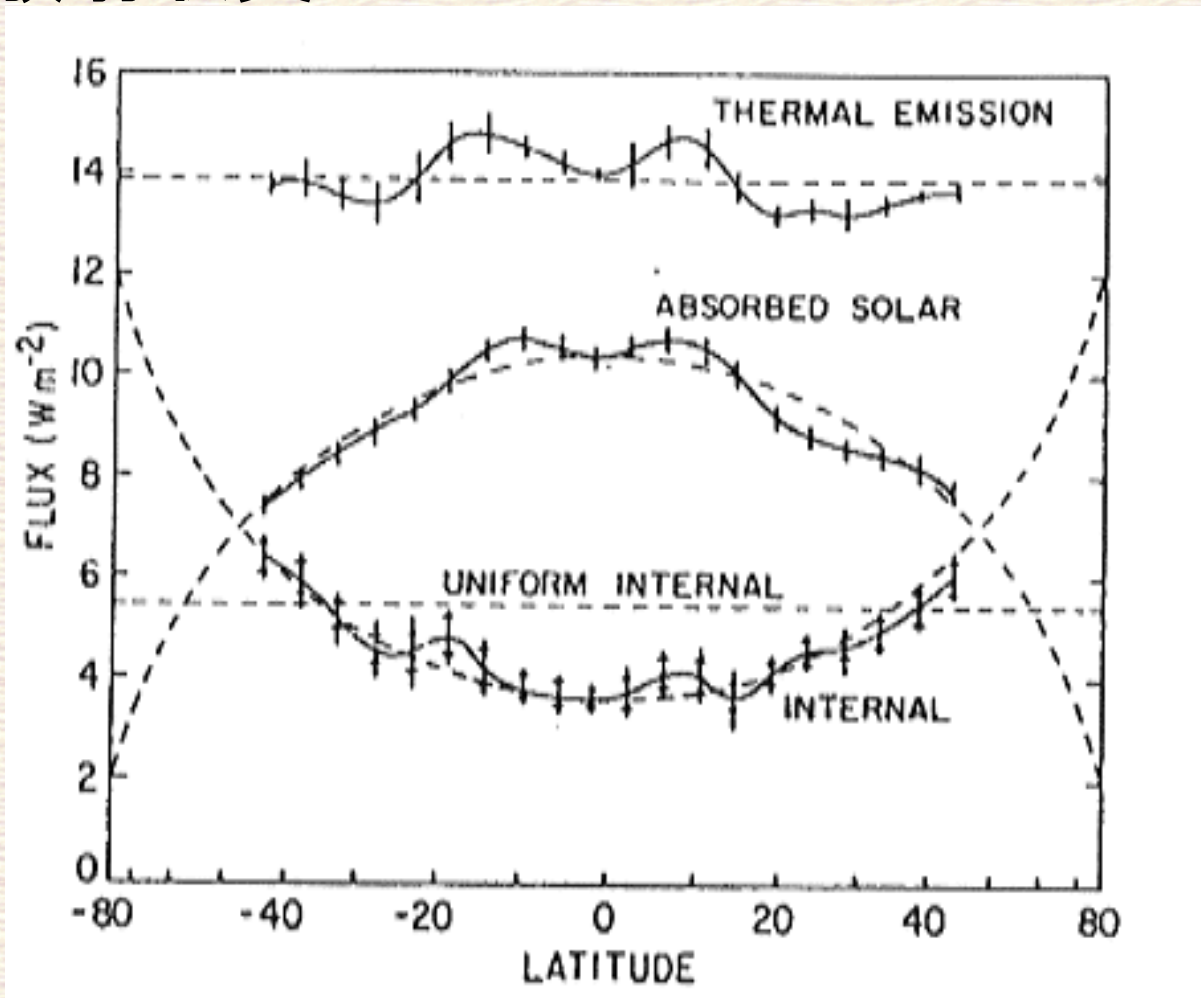
TOP PANEL : ZONAL WIND AND ANOMALY (m/s).
Contour shows wind speed in an interval of 3m/s.
Shaded pattern shows wind speed anomalies in an interval of 5m/s.

MIDDLE PANEL : TEMPERATURE (K) AND ANOMALY (°C).
Contour shows temperature in an interval of 10K.
Shaded pattern shows temperature anomalies in an interval of 1°C.

BOTTOM PANEL : VERTICAL VELOCITY (hPa/day).
Contour interval is 2hPa/day. Shaded area show upward flow.
Base period for normals are 1979-1993.

地衡風平衡：浅いモデルvs深いモデル

● 木星の放射収支



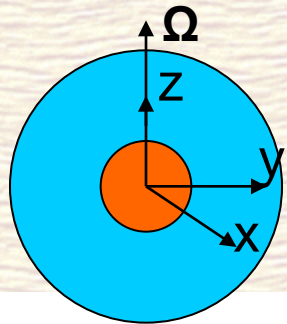
Pirraglia 1984 Icarus

地衡風平衡：深いモデル

- 深いモデルの力学：弱い成層構造

- 「鉛直」方向に静水圧平衡

- コリオリカは「水平」方向だけが働く



$$\frac{\partial v}{\partial t} + (2\Omega + \nabla \times v) \times v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi + \tilde{\nu} \nabla^2 v$$

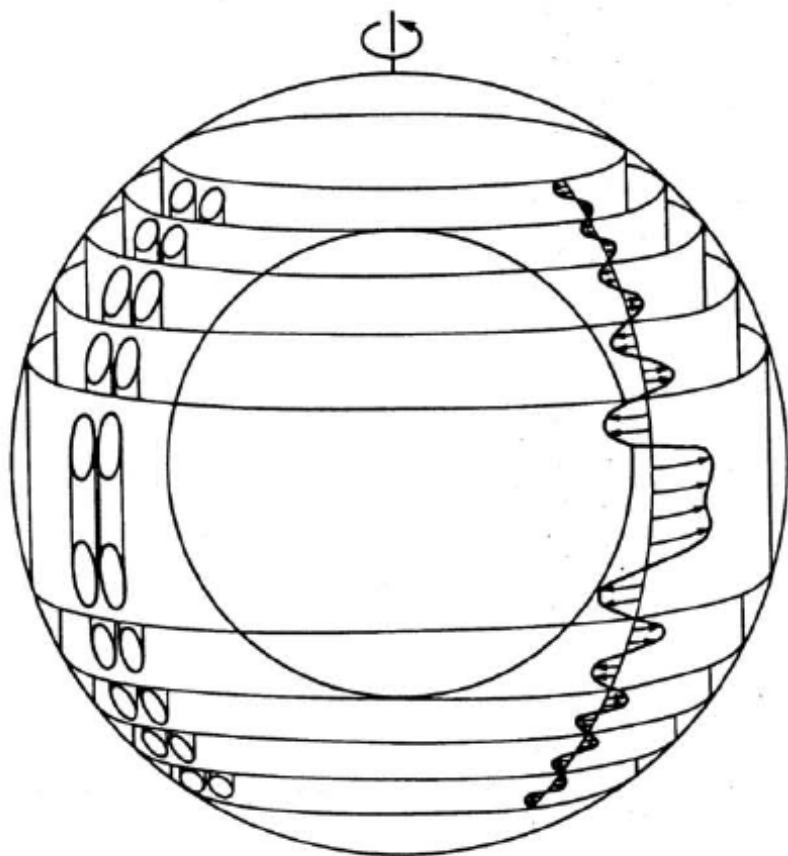
$$2\Omega \times v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi$$

$$\begin{aligned} -2\Omega v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ 2\Omega u &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

地衡風平衡：深いモデル

- Busse (1983) 深い対流による加速のイメージ
 - 摂動展開による数学的議論をもとにイメージしたもの
 - 実際に数値計算したわけじゃない



Busse (1983)

子午面循環

地衡風平衡の崩れがあつてはじめて回転軸と直行する向きの東西平均輸送が可能

乱流・波に対する処方箋の現状

有限自由度の配分に関する手順は，地球大気に関してはある程度できている。

- 全球規模モデル系では，鉛直混合と水平混合を区別
 - 乱流エネルギーを評価して鉛直混合モデル
 - 水平は二次元乱流モデル
- 局所モデルでは，鉛直水平混合を区別しない
 - 乱流エネルギー方程式を作って乱流混合を評価
- 湿潤問題に対しては
 - 局所モデルでは雲粒・雨粒問題
 - 全球規模の浅いモデルでは積雲問題
- 地表面フラックス
 - バルク形式と呼ばれる乱流フラックスの評価方法
- 波
 - たぶんに経験則的に運動量再分配を導入

乱流・波に対する処方箋の現状

地球で答え合わせしたものを他の惑星にもっていてもうまく行くとは限らない（たぶんうまく行かない）。

- 乱流の構造（エネルギー分布）が違う
- 波の構造（波の種類とエネルギー分布）が違う

具体例少々

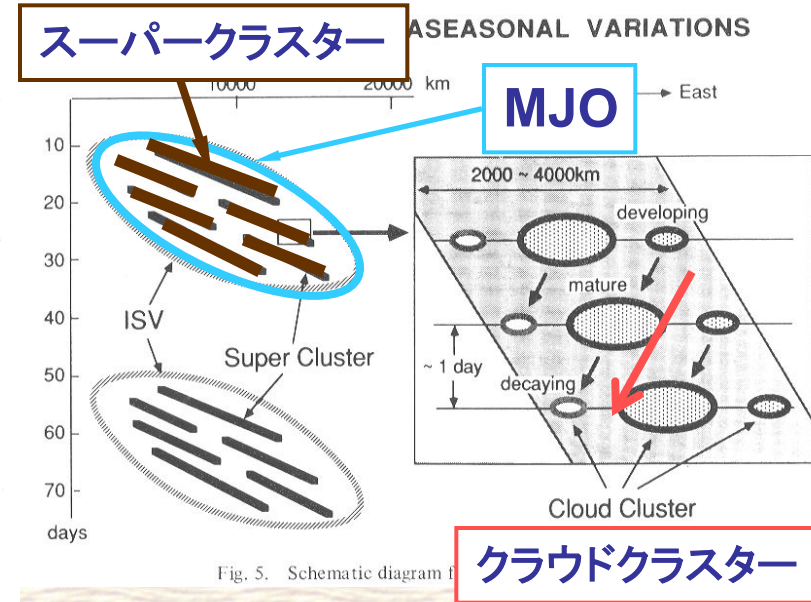
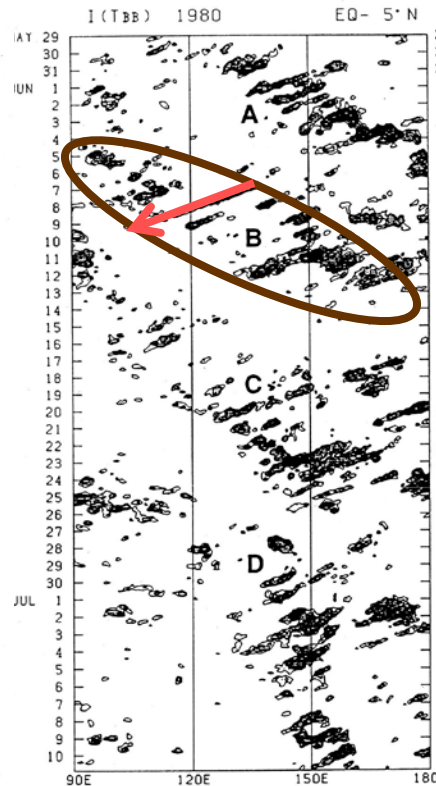
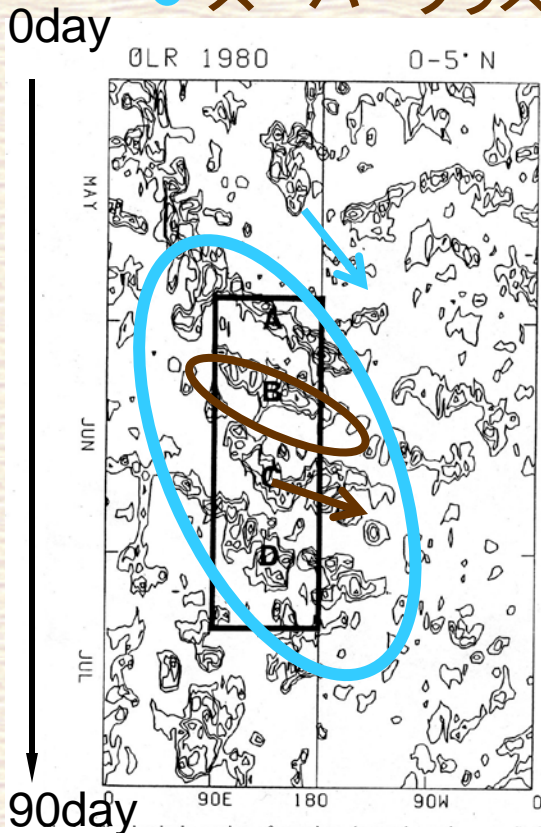
- ちょっと変わった地球 (APE)
- 火星
- 木星



地球の場合：赤道域降水活動に対する認識

● 衛星観測での階層的な降水構造 (Nakazawa, 1988)

- MJO (Madden-Julian 振動) (東西波数1, 30~60 日周期で東進)
- スーパークラスター (水平スケール 3000~5000 km, 5~10 m/s で東進)



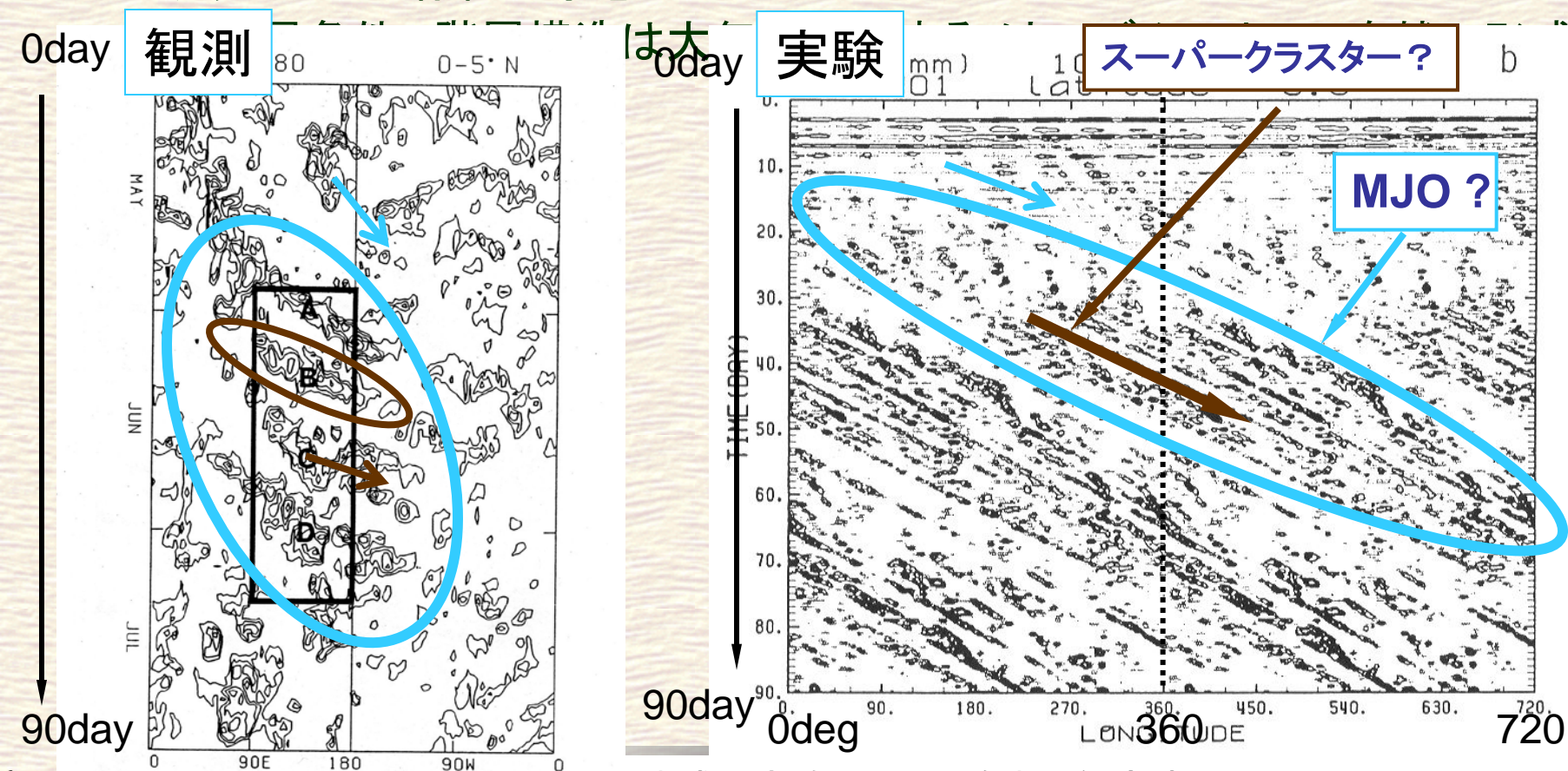
APE(水惑星実験)

- 仮想あるいは理想惑星大気の設定での循環構造の数値的探求
 - 現実とは異なる仮想的で単純な設定の元での惑星大気循環を大気大循環モデル (GCM) によって数値的に求め、うまい特徴を発見抽出し、翻って、現実大気循環に対する洞察を得ようという試み.
 - 水惑星条件: 地面・地形はめんどくさいので全部海面にしちゃう.
 - 単純な設定では、モデルの素な振る舞いが明らかになる.

APE(水惑星実験)

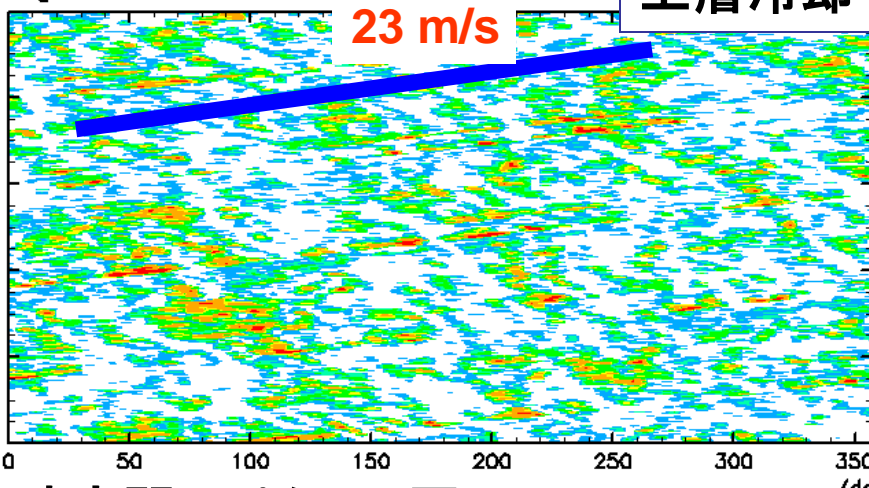
● 水惑星実験における降水構造 (Hayashi and Sumi, 1986)

- 大気大循環モデル (GCM) を用いた数値実験による MJO の表現とスーパークラスターの存在の予想



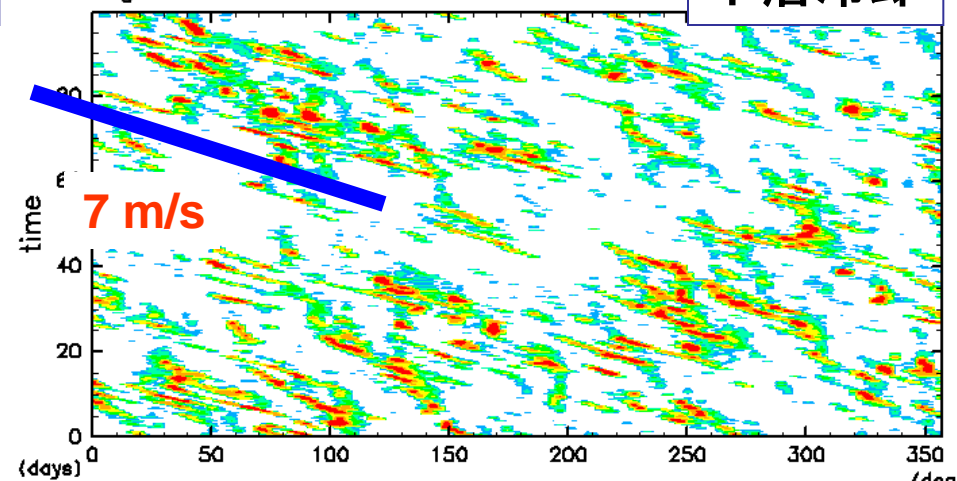
APE放射冷却率依存性

降水量 (赤道上経度時間図)
($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

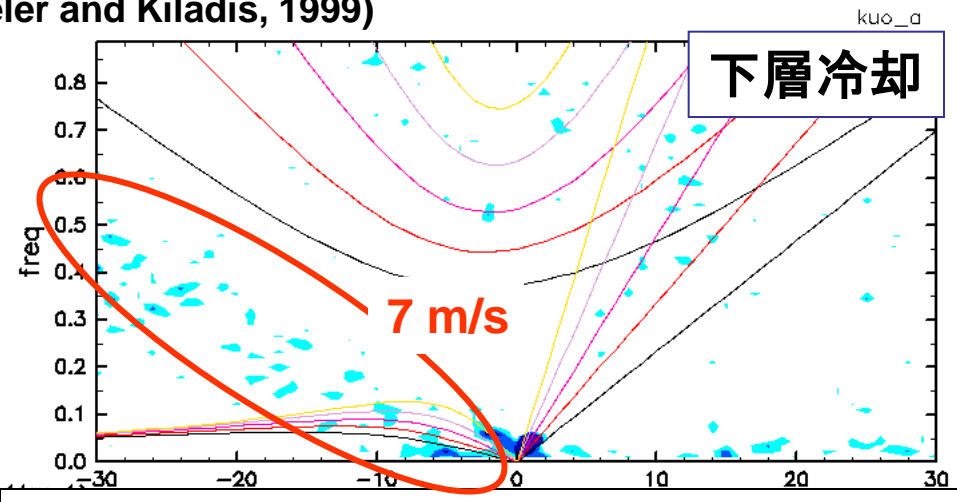
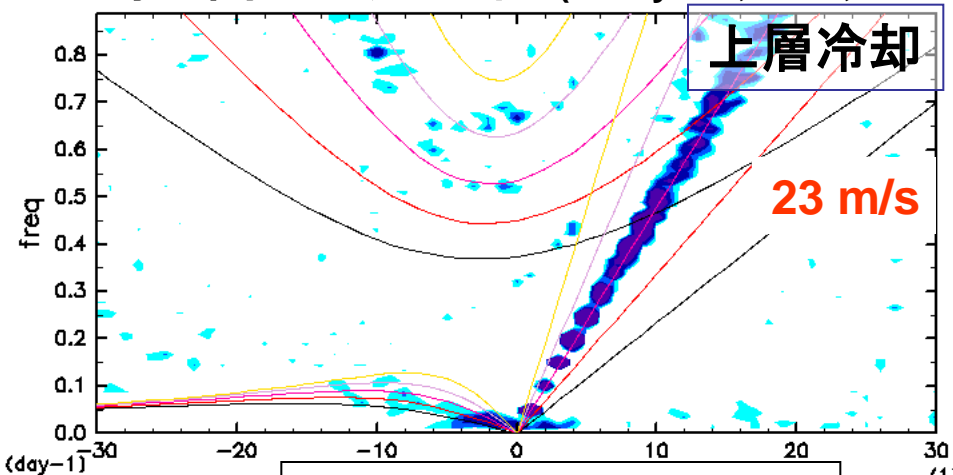


(Kuoスキーム)

($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



時空間スペクトル図 (Takayabu, 1994; Wheeler and Kiladis, 1999)



Kelvin wave-CISK 的

背景風移流 CIFK (第一種条件付き不安定) 的

— h = 12 — h = 50 — h = 200
— h = 25 — h = 100

— h = 12 — h = 50 — h = 200
— h = 25 — h = 100

(Yamada 2007)

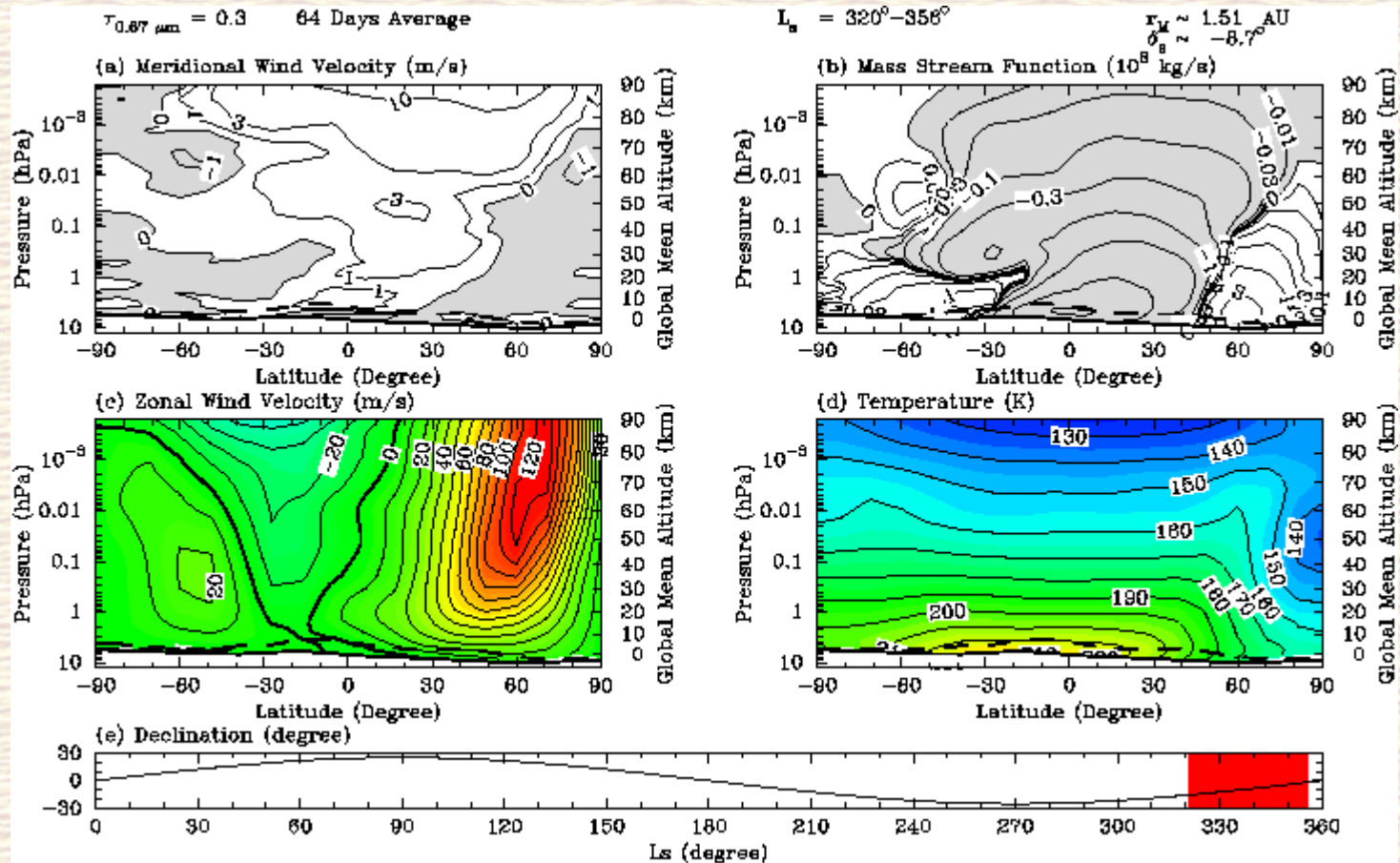
地球の場合

天気予報がニーズなのだけど、雨冠の現象は難しい。

- 凝結加熱に伴う強い非線形性
- 水蒸気の供給と輸送の表現
- 微細現象（雲粒・雨粒）
- 小スケール（10km）現象（鉛直対流特に降水を伴う現象）

火星の場合

日変化が大きいいことを除けば「地球」的



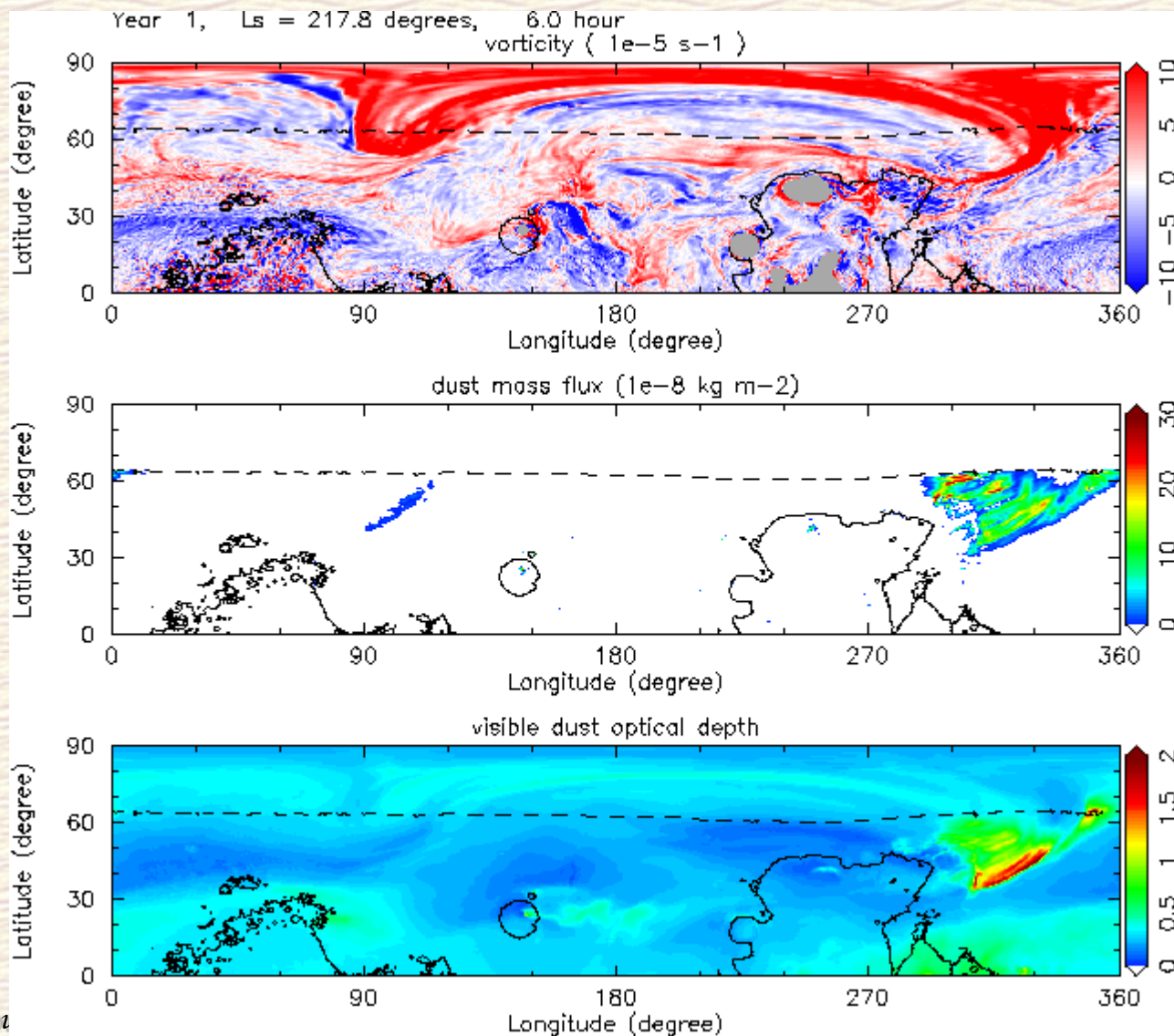
火星の場合

地球モデルを持ってきたらそこそこ走る.

- ダストストームが起こらなかった
- 地表面乱流フラックス評価のやり直しがひつようだった
 - 乱流の構造が違うため：乾燥対流 v s 湿潤対流

火星実験, ダストストーム

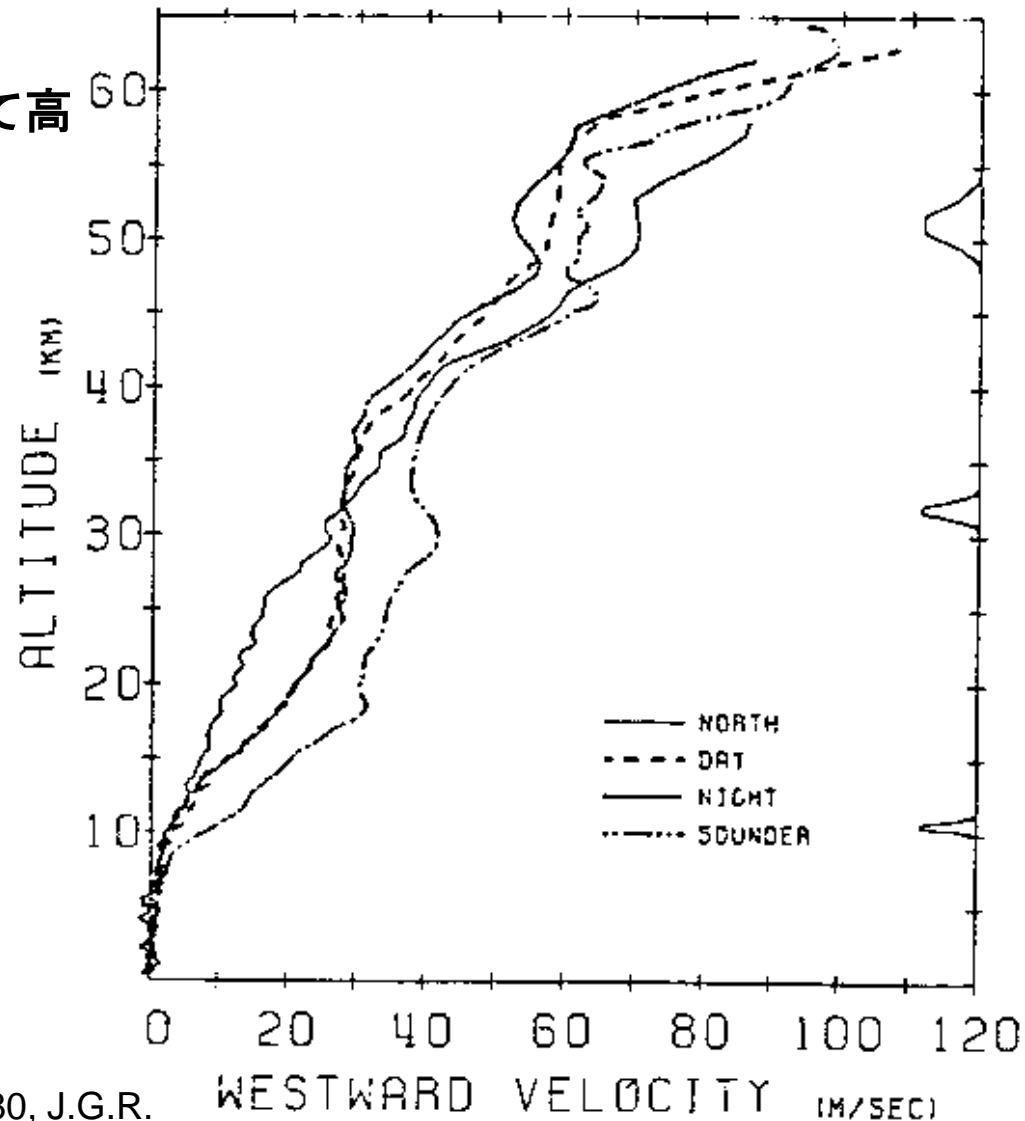
T319L96 (格子間隔~22 km)



金星の場合

4日循環

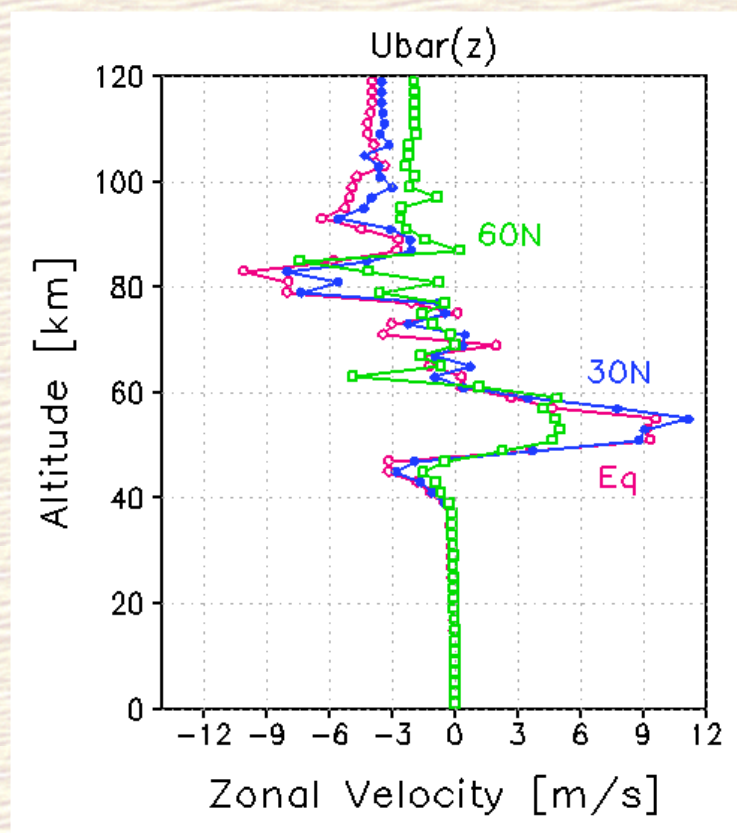
- 固体惑星の自転角速度に比べて高速な流れ
- 100m/s 程度
- 自転周期-243日
赤道自転速度-1.4m/s



金星の場合

4日循環

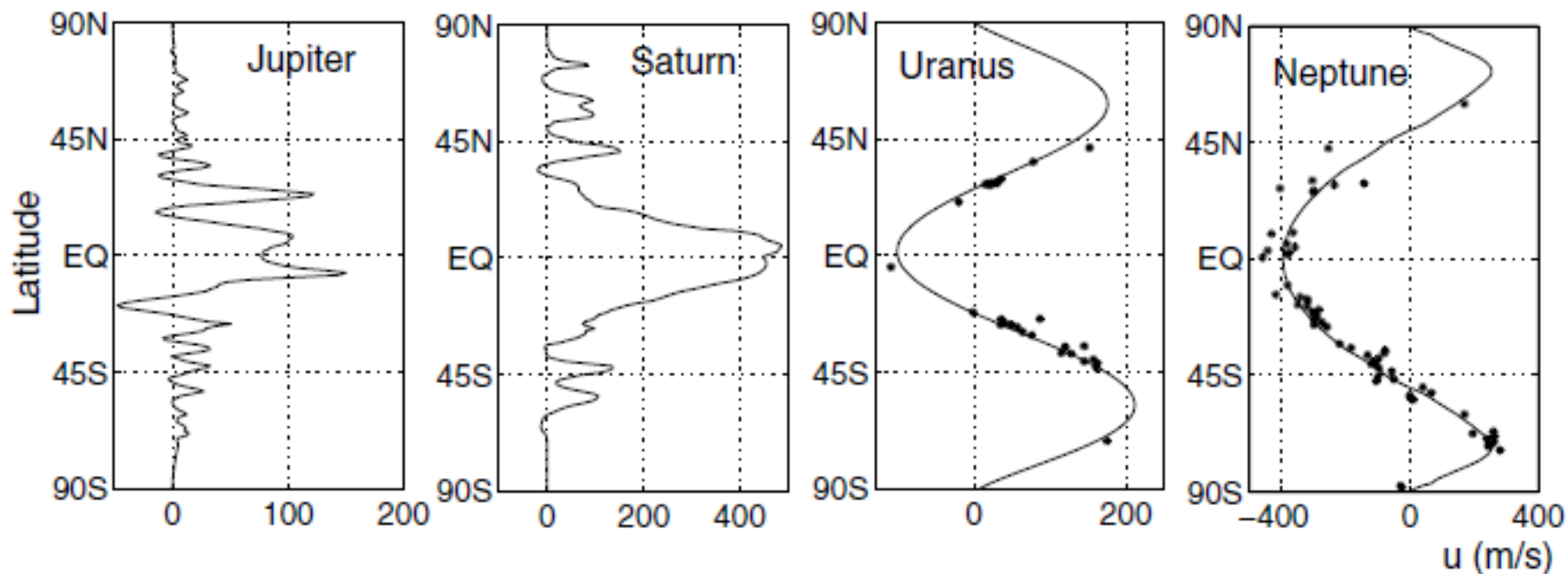
- 自励的高速回転が計算できるようになりつつある
 - 潮汐波動による運動量輸送
 - 波の表現に足る鉛直分解能
 - どこで波の散逸が起こるのか正しく表現する必要
- 実は、現状、まっとうな金星の放射計算が組み込まれた循環モデルはできてない



外惑星の場合

● 木星・土星・天王星・海王星

- 木星・土星：赤道西風
- 天王星・海王星：赤道東風



Sukoriansky et al. 2002 Phys. Rev. Let.

浅いモデル: Williams (1978)

強制乱流,
非発散二次元回転球面

- 128x128 格子点モデル, 1/8 セクター 0-80N
- 木星パラメター
 $a=70000\text{km}$, $\phi=1.76$

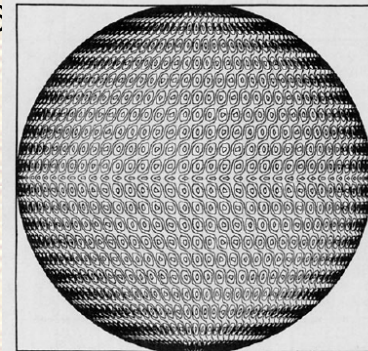


FIG. 15. Case J2. Forcing field F at 73.6 days.
 $\Delta F = 5 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$.

基本的な特性

- 縞帯!
 計算されたRMS
 速度 $\langle u \rangle = 32 \text{ m/s}$
 at day=294.4
 $\phi_{\square} = \phi a / \langle u \rangle = 385$
 $k_{\square} = (\phi a / \langle u \rangle) \cdot \text{[some symbols]} = 20$
 Rhines scale とあってる?
 ● スペクトル- 5/3?, -5?

GFDLならではの仕事
 1970年代の他のグループでは追従不可能

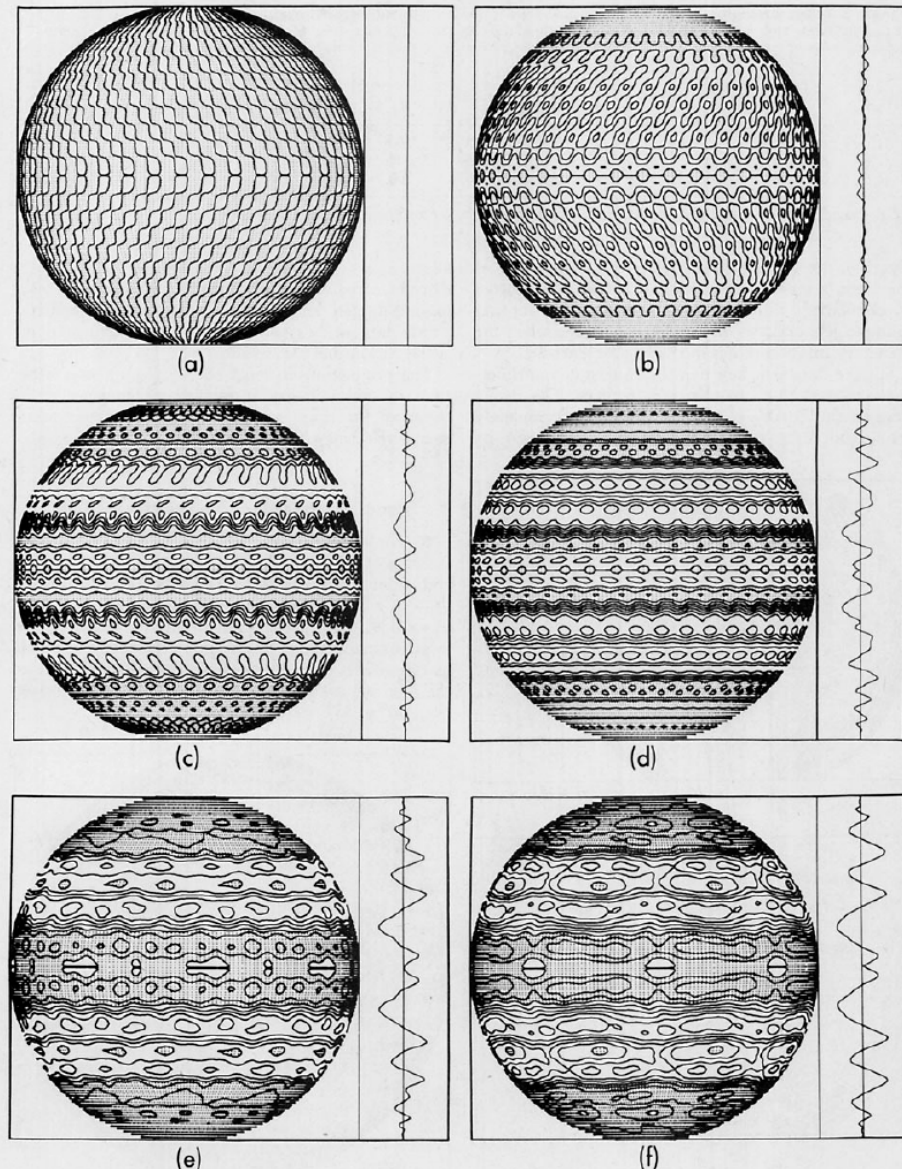
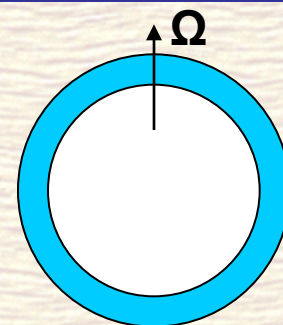


FIG. 16. Case J2. Streamfunction at days (a) 4.6, (b) 23.0, (c) 46.0, (d) 73.3, (e) 161, (f) 294.4. $u^* = 100 \text{ m s}^{-1}$, (a)-(d) $\Delta\psi = 40 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$, (e)-(f) $\Delta\psi = 80 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$. Computational sector is repeated for global display. A cine version of this solution is available.

浅いモデル

- 最も簡単な浅いモデル

- 鉛直方向は1層
- 運動は球面上に拘束された2次元
- 非発散

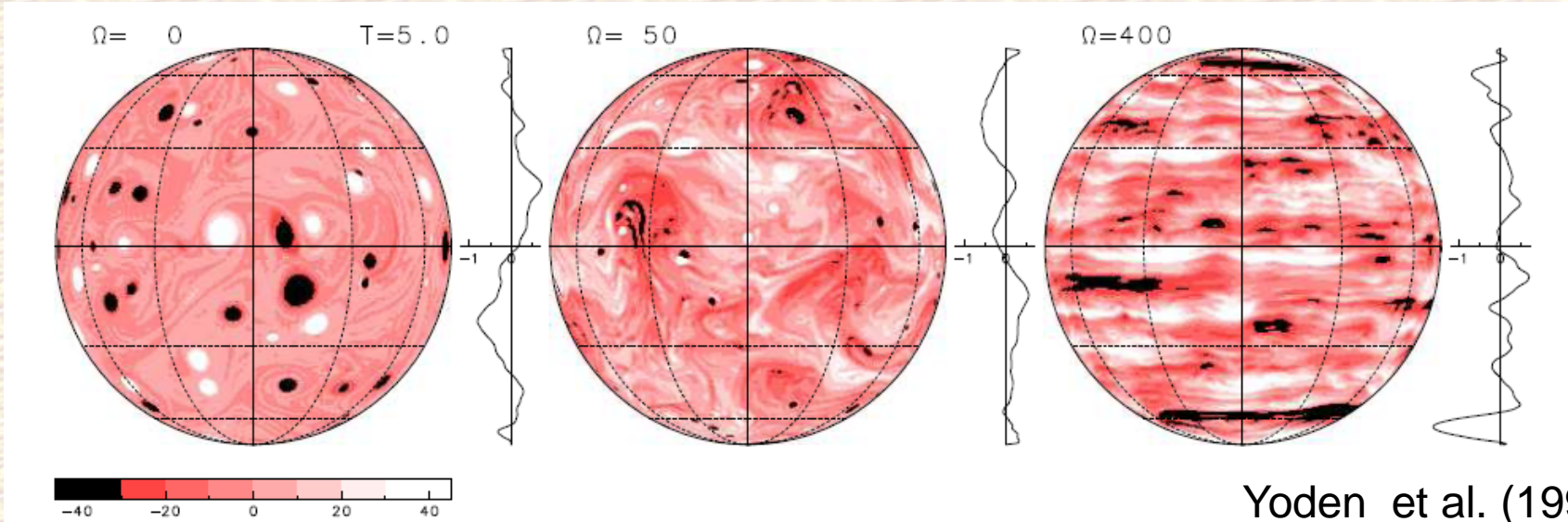


$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \phi}{a} - 2\Omega v \sin \phi = -\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + 2\Omega u \sin \phi = -\frac{1}{a} \frac{\partial p}{\partial \phi}$$

$$\left(\frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial \cos \phi v}{\partial \phi} \right) = 0$$

T341 結果



Yoden et al. (1999)

Movie1

Movie2

Movie3 Movie4

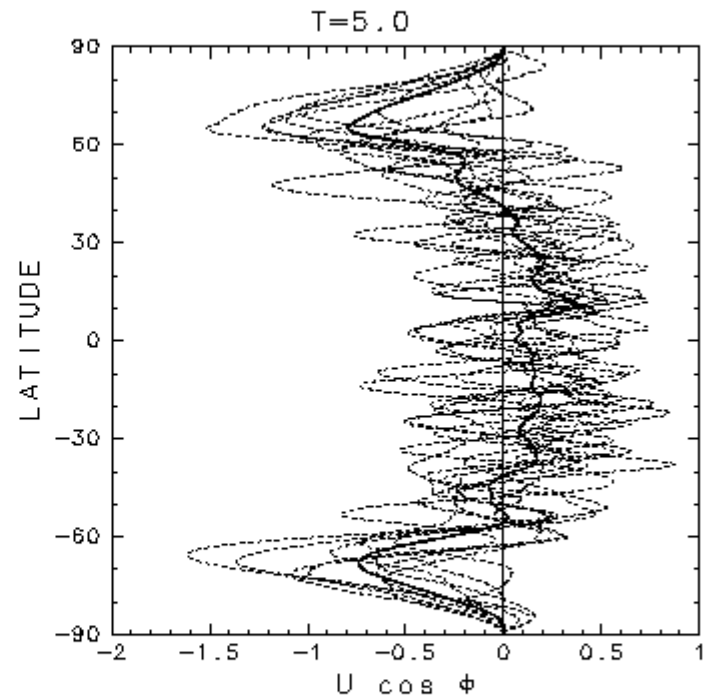
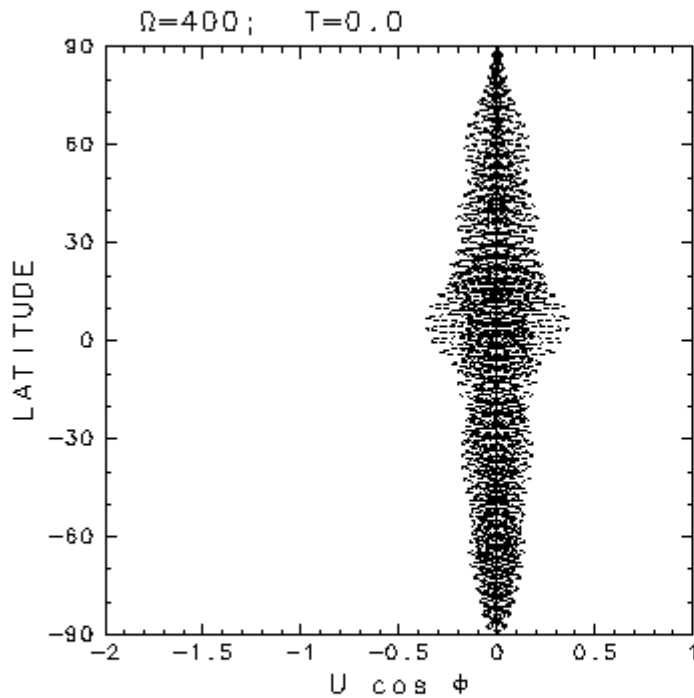
Movie4 (Ishioka et al., 1999)

Figure 3. Vorticity fields at $t = 5$ of the cpn050 experiment for $\Omega = 0$ (left), $\Omega = 50$ (center), and $\Omega = 400$ (right) with the T341 model. Orthographic projection from $\lambda = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ is used and lines of meridians and parallels are drawn for every 30° . Solid line on the right side of each panel shows the zonal mean zonal angular momentum as a function of sine latitude.

動画は日本流体力学学会のマルチメディアジャーナル <http://www.nagare.or.jp/mm/99/ishioka/>

平均流生成 $\Phi=400$

- $n_0=50$ $\Phi=400$
 - 縞帯構造
 - 周極東風ジェット

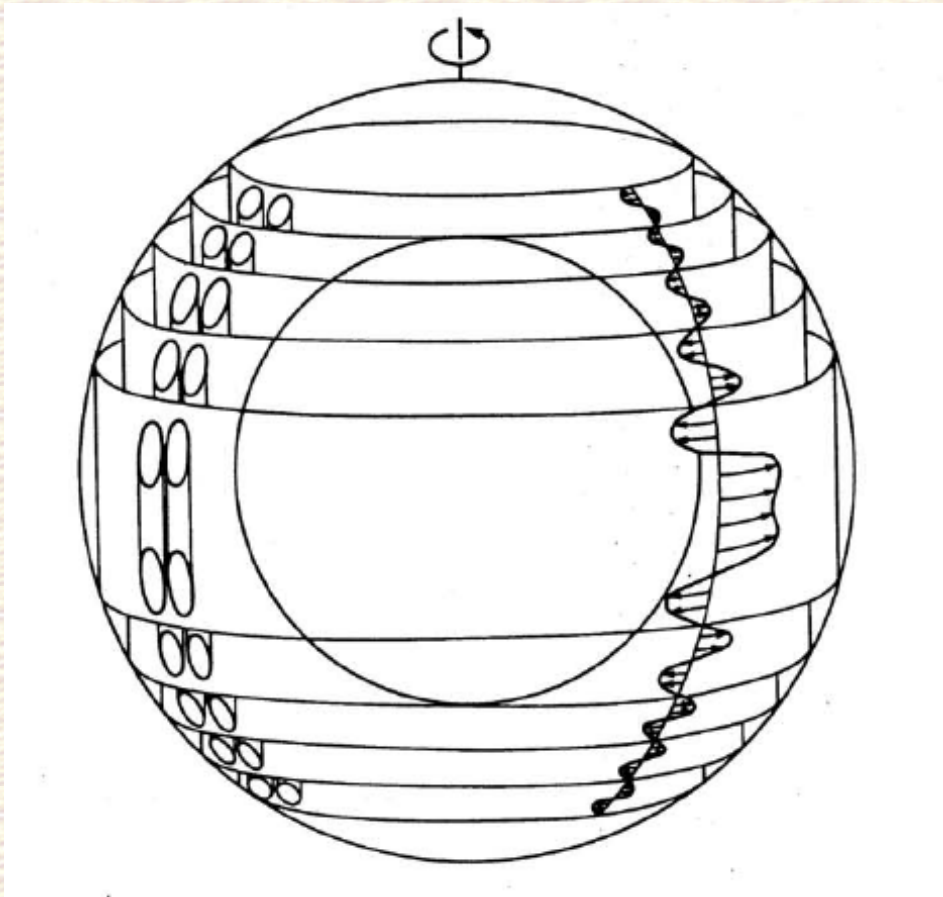


T341 CPN050

(Yoden et al. 1999)

深いモデル: Busse (1983)

- Busse (1983) (vs. Williams, 1978)
深い対流による加速のイメージ



Busse (1983)

回転球殻ブシネスク対流

■ ブシネスク流体

$$P_r^{-1} \frac{D\mathbf{v}}{Dt} + T_a^{1/2} \mathbf{k} \times \mathbf{v} = -\nabla\pi + Ra\theta\mathbf{r} + \nabla^4\mathbf{v}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla(T_0 + \theta) = \nabla^2\theta$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$P_r = \frac{\nu}{\kappa} \quad \text{Prandtl number}$$

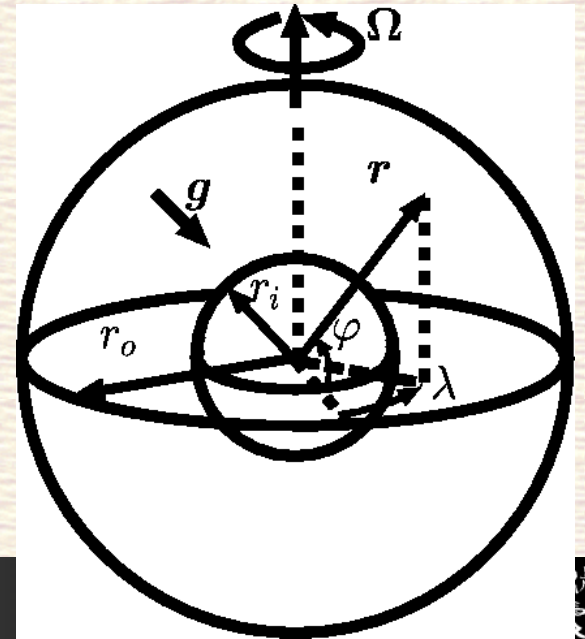
$$T_a = \left(\frac{2\Omega d^2}{\nu} \right)^2 \quad \text{Taylor number}$$

$$Ra = \frac{\alpha\beta\gamma d^6}{\kappa\nu} \quad \text{Rayleigh number}$$

■ 熱対流

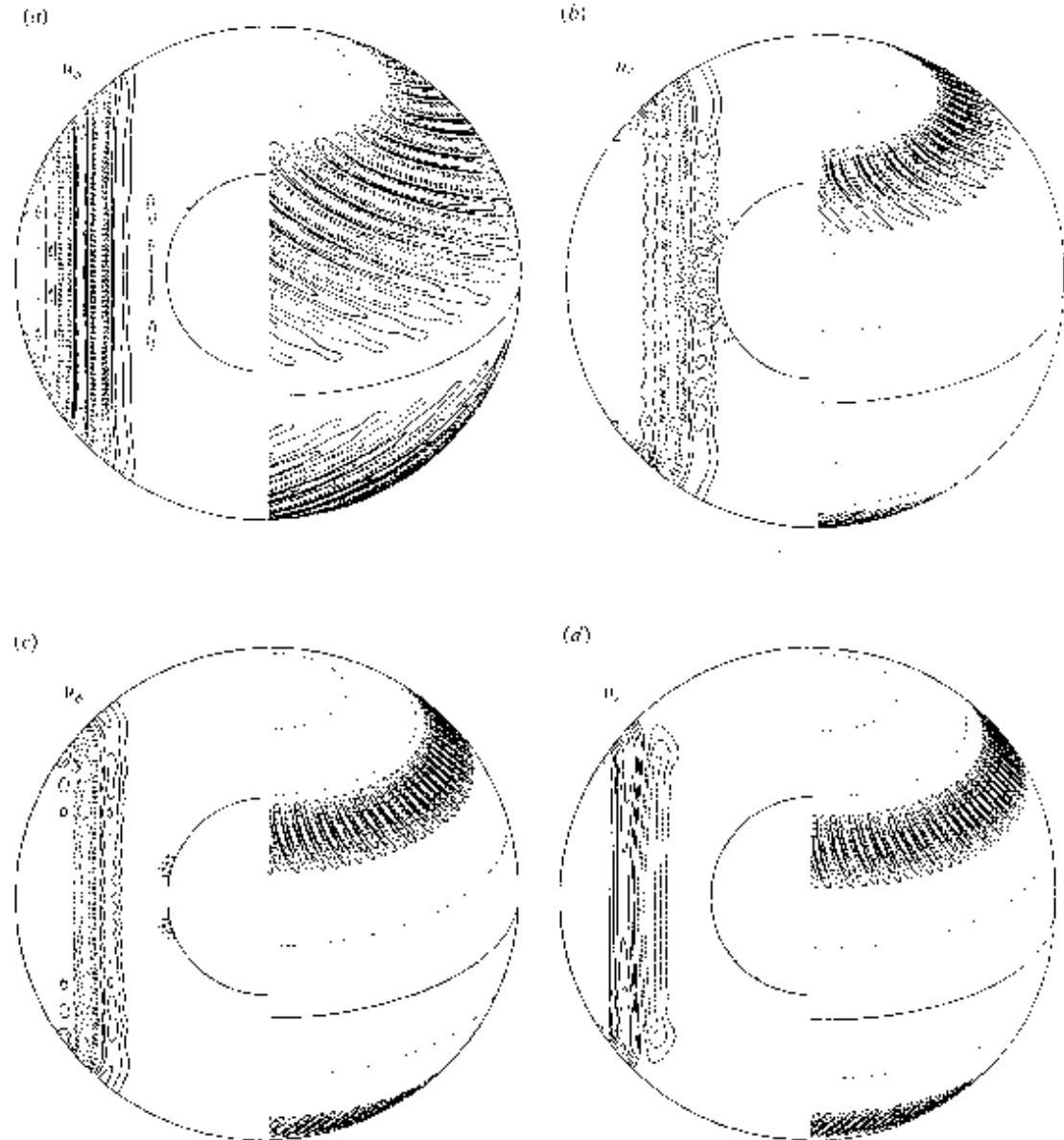
内殻境界で加熱

外殻境界で冷却



回転球殻ブシネスク対流の対流セル構造

- Zhang (1992)
対流セルはロスビー波
構造を持つ

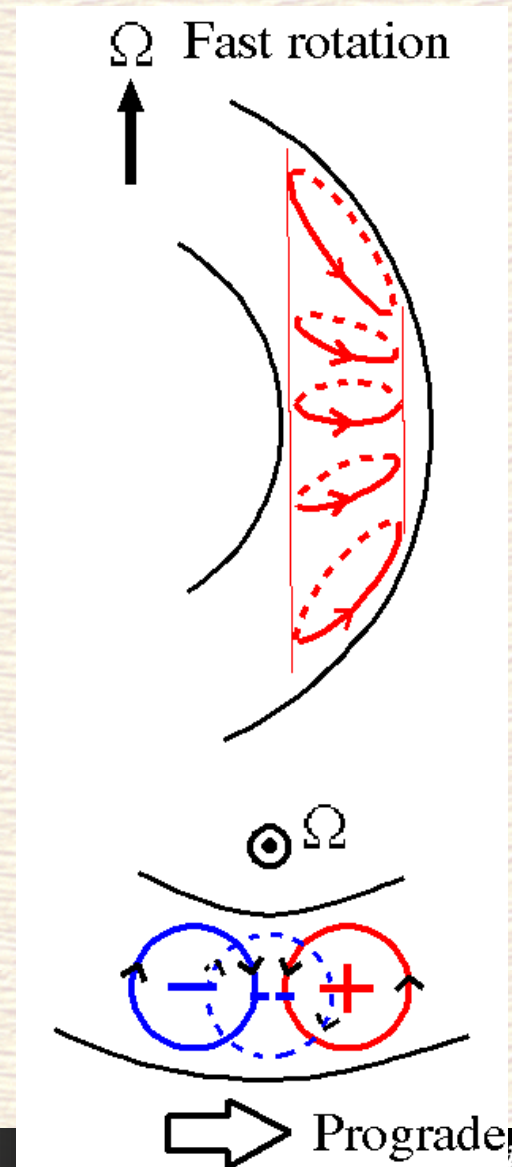


Zhang (1992)

回転球殻内のロスビー波

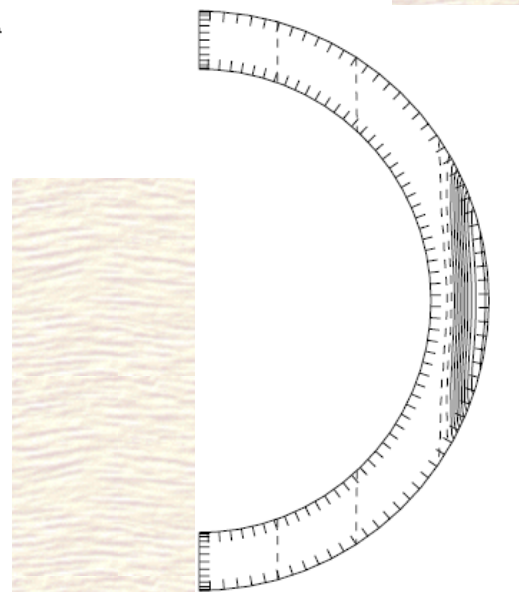
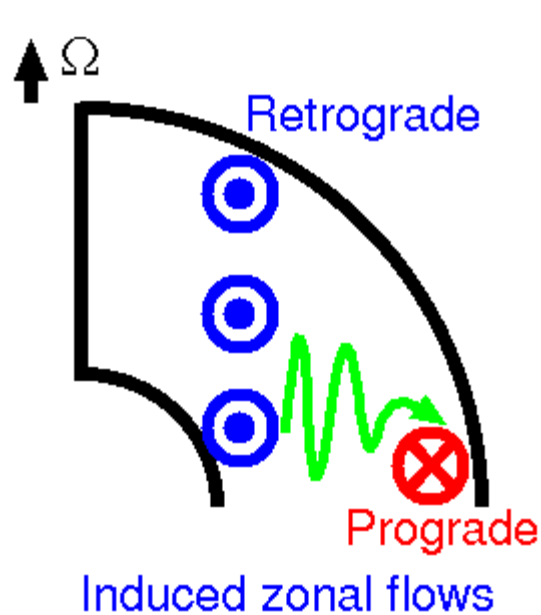
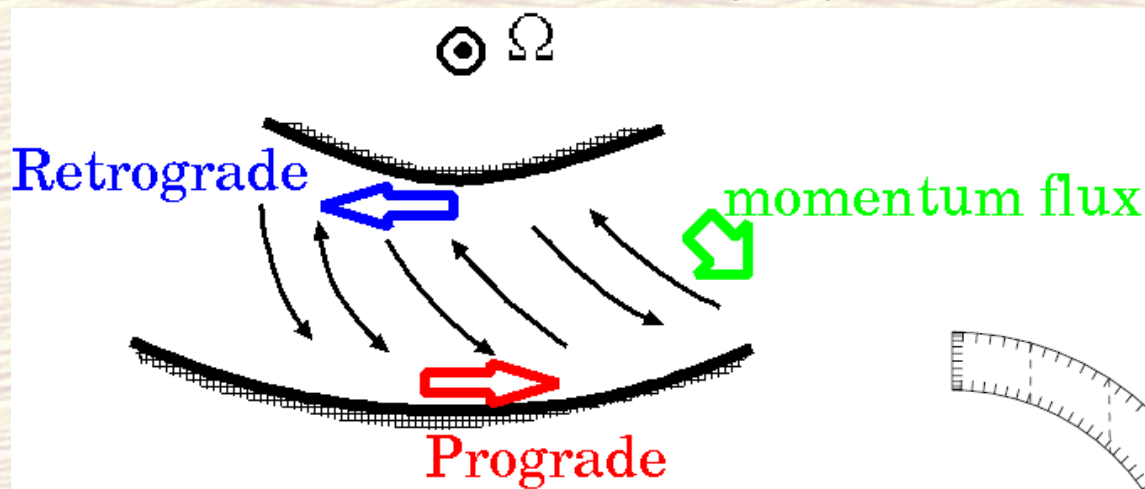
■ ロスビー波構造

- 渦位は回転軸外向きに増加
- ロスビー波位相速度は東向
- ロスビー波にともなう角運動量は西風(東向)



回転球殻内のロスビー波による加速

- 回転球殻内ロスビー波による加速は超回転(東向き)である



ロスビー波構造を持つ対流セルによる弱非線形平均流生成

Aurnou and Heimpel (2004)

- Aurnou and Heimpel (2004)

T192L81

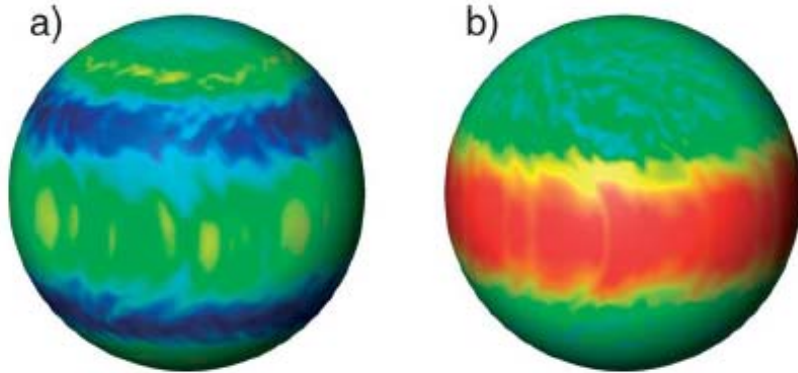


Fig. 4. Azimuthal velocity on the outer boundary, r_o , for $E = 3 \times 10^{-4}$ and $Ra = 3 \times 10^6 \simeq 30Ra_C$. (a) *FBC*; (b) *MBC*. Red represents prograde flow (eastward flow; positive Ro); blue represents retrograde flow (westward flow; negative Ro). The same color scale is used in (a) and (b).

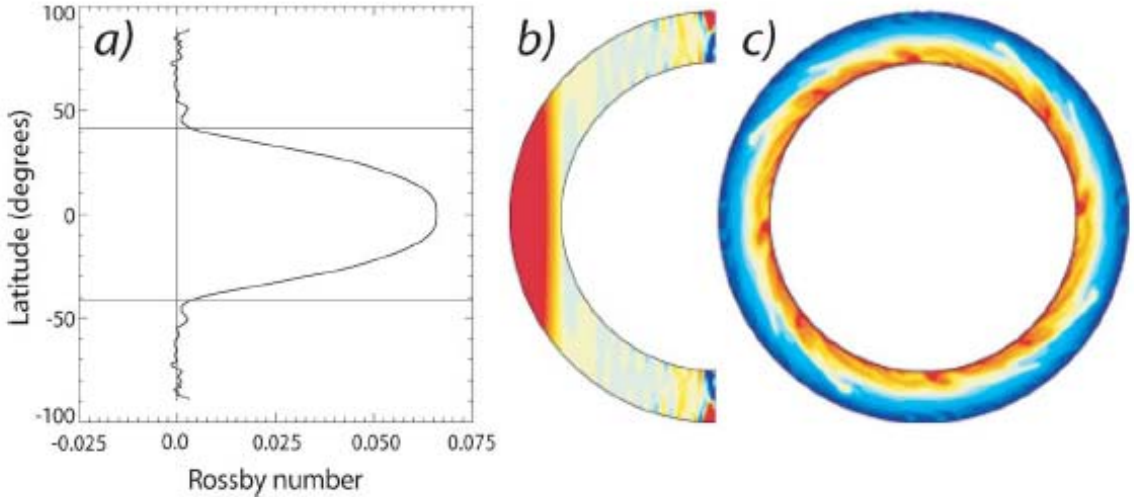


Fig. 5. Plots of (a) zonally-averaged azimuthal surface velocity versus latitude, (b) meridional slice of zonally-averaged angular velocity, and (c) equatorial temperature contours viewed from the northern pole for the *MBC* case with $E = 10^{-4}$ and $Ra = 10^7$.



どうするか



気象予報・気候予測での限界

■ 天気予報・気候再現と予測の現実

- それなりに数値計算できるゆえんは自然界の構造をある程度知っているから
 - ◆ 数理物理的構造
 - ▶ なぜそうなるかを知ることのひとつ
 - ▶ 計算の勘所を与える＝そこさえ表現できればおおむね良い
 - ◆ 観測＝答えを見ちゃうこと
 - ▶ なぜそうなるかを知らなくても表現するべきものがわかる
- 限界
 - ◆ 答を知らないとどう計算していいかわからない
 - ◆ 基礎方程式が同じだからといって違う状況でうまく計算できるとは限らない

対策

■ 妙案がないので地道にやる

- わからないことは既存の知識でいいことにする
- 地球と同じと思うとか...

惑星科学的展開における問題

- 観測できない世界の計算力の確保のために
 - 地球で得られてきた常識の再検討
 - ◆ 防災や環境予測などのニーズの高い研究と同じだけのマンパワーと資源が必要となるがそれは望めない
 - 数値モデルの世界での相互検証
 - ◆ さまざまなレイヤー(物理的階層)に特化した階層的に存在する数値計算モデル群による相互検証
 - ◆ 地球の気象学・気候学で培われてきた(あるいはさらに新たな)数値モデル群のラインアップが必要
 - ◆ しかし、マンパワーと資源はあまりかけられない
 - ▶ 温暖化対策予算がないと出来なのでは出来ない

ソフトウェア開発



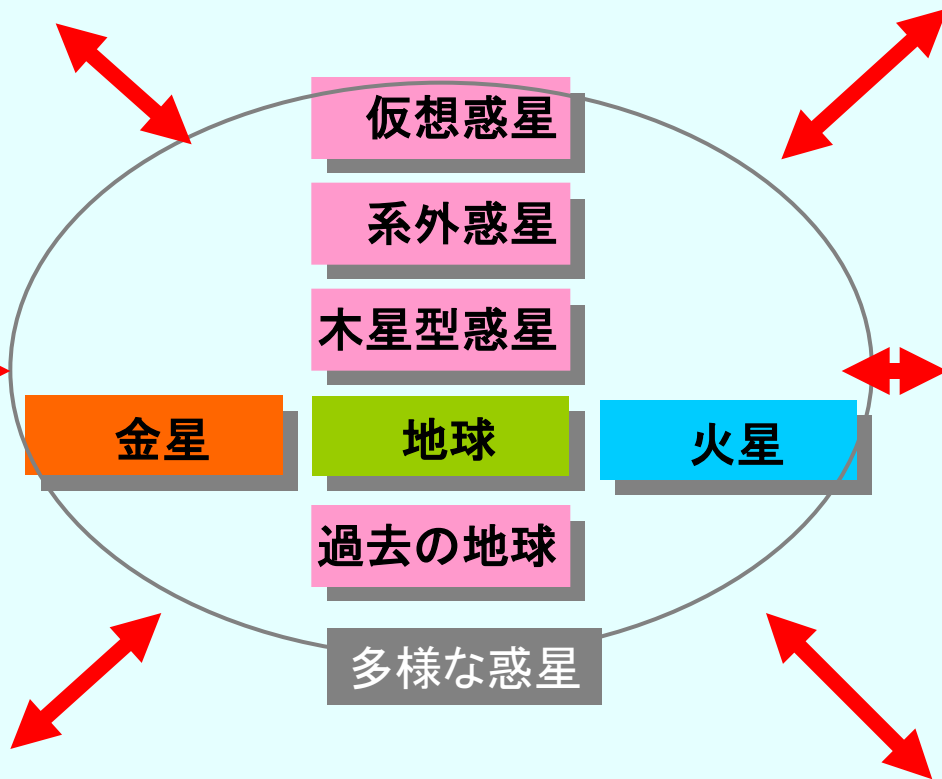
階層モデル群

鉛直1次元放射対流平衡モデル

南北1次元エネルギーバランスモデル

雲解像モデル

球面2次元浅水モデル



金星

仮想惑星

系外惑星

木星型惑星

地球

火星

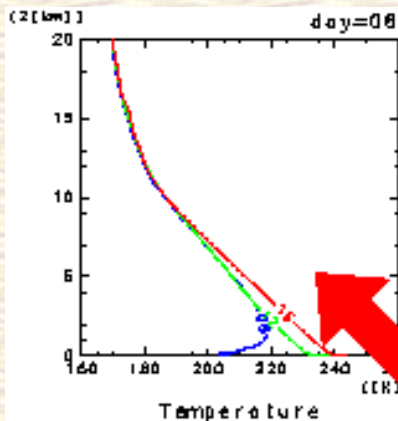
過去の地球

多様な惑星

球殻3次元静水圧モデル

球殻3次元フシネスクモデル

仮想気候サーベイヤー (Virtual Climate Surveyer, VCS) の開発

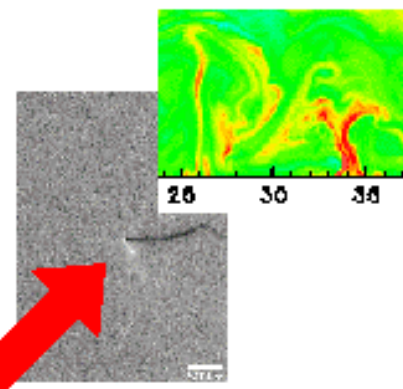


放射対流モデルによる鉛直大気構造の理解

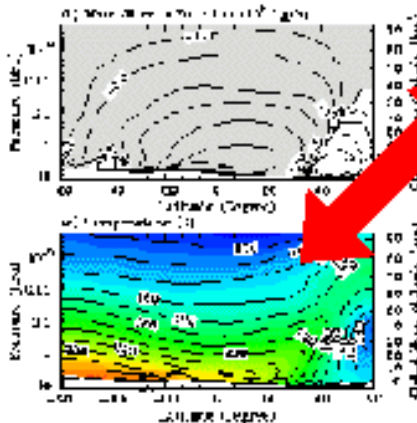


太陽系惑星との比較

階層的モデル群によるアプローチ



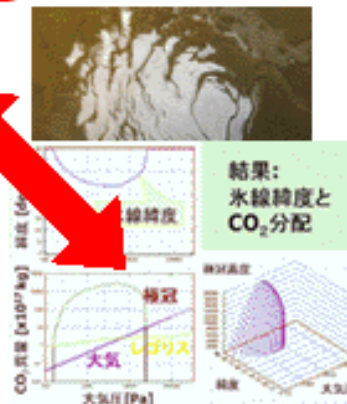
雲解像モデルによるダストデビルの再現



GCM による大気大循環の研究



仮想的惑星気候のシミュレーション



EBM による極冠の成長・後退の計算

更なるサブシステム(海洋・氷・陸面・固体地球)との階層的結合

仮想気候サーベイヤー

(Virtual Climate Surveyer, VCS) の開発

■ ヒーローからルーチンへ (V.Balaji@GFDL)

- 本当かどうかわからない世界の予測を様々な側面から様々な背景の人が再考察することを可能にする環境の提供
 - ◆ 個々の研究で得られてきた知見を検証可能な形で集積
 - ◆ 個々の研究で開発され使われてきた数値モデルを利用可能な形で提供

■ サイバーインフラストラクチャー

- 個々のモデルやデータをやり取りするためのメタな情報ツール
 - ◆ 遠方のデータの活用
 - ◆ 人のモデルの利用

ソフトウェア開発

■ 2本立て

- 惑星流体科学のための階層的数値モデル開発：
dcmmodel プロジェクト(2002～)
 - ◆ 惑星大気の循環、地球のコアやマンツルの運動を考察するための数値モデルを自前で開発するプロジェクト
- データ構造、可視化・解析ツールの開発：
davis プロジェクト(1998～)
 - ◆ 地球流体現象に関連する多次元データを想定
 - ◆ キャッチフレーズは「クリック一発で絵が描ける」
 - ▶ いろいろなデータが同じツールを使って解析できる

開発中のモデル一覧

■ dctrn

- 放射伝達

■ oboro

- 1次元熱力学平衡大気モデル

■ SPMODEL

- 階層的地球流体スペクトルモデル集
- 1次元移流モデルから3次元球殻まで

■ deepconv

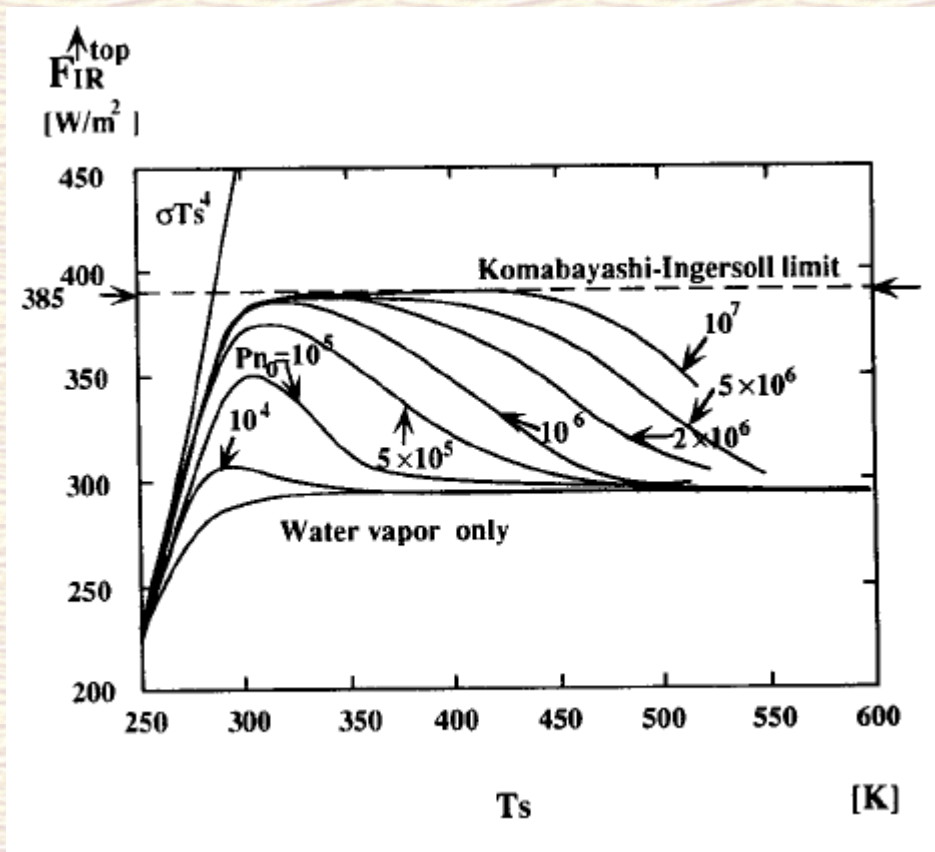
- 2次元/3次元非静力学モデル

■ dcpam

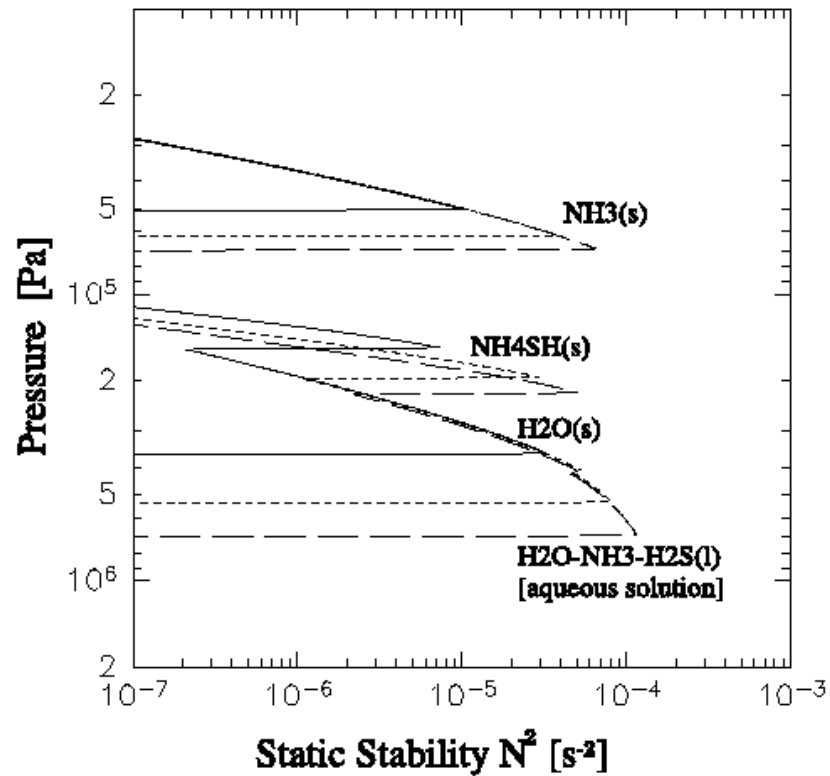
- 3次元球面大気モデル(1次元から3次元まで...)

◆ SPMODEL の枠組みを利用し設計

鉛直1次元モデル

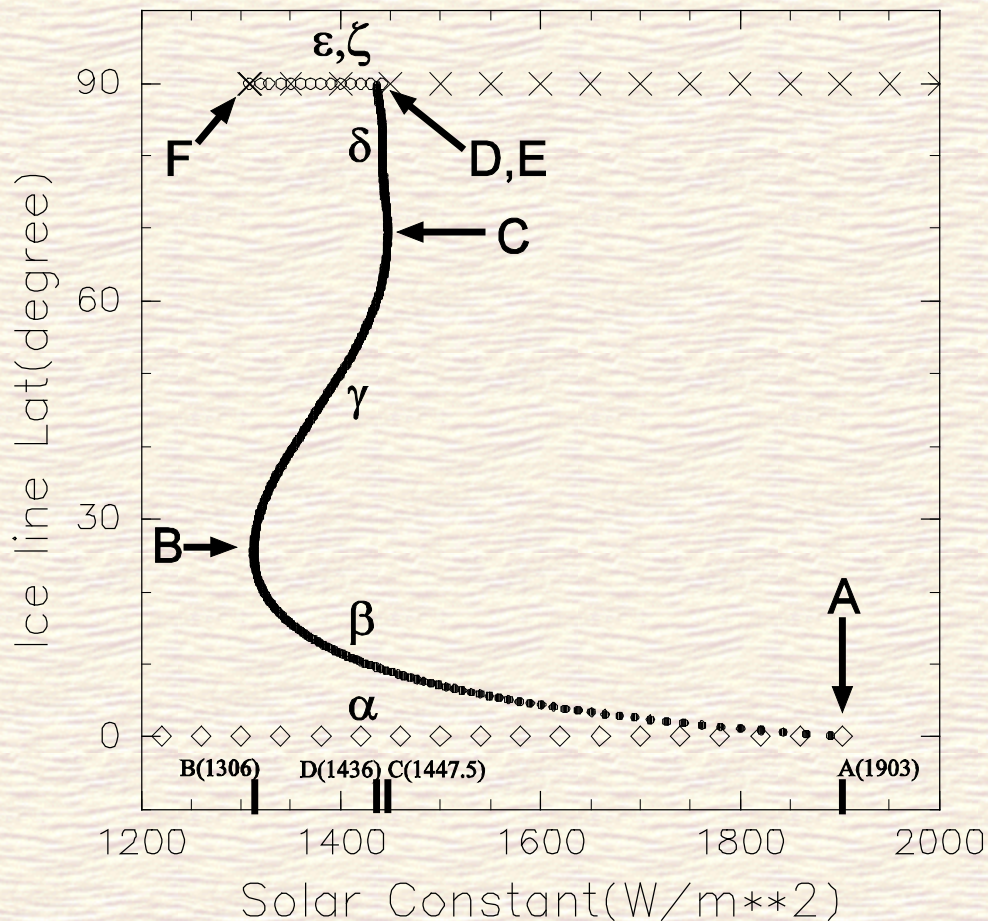


暴走温室状態:
Nakajima et al. (1998, JAS)



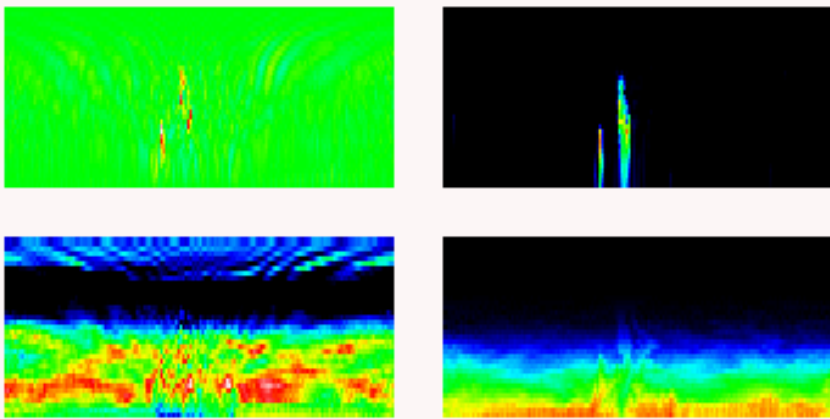
木星型惑星大気の熱力学モデル:
Sugiyama et al. (2006, GRL)

南北1次元エネルギーバランスモデル

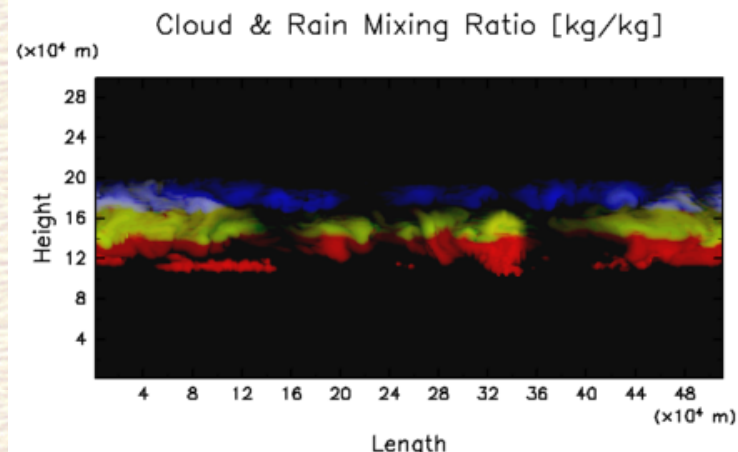


暴走温室状態と全球凍結状態:
Ishiwatari et al.(2007, JGR)

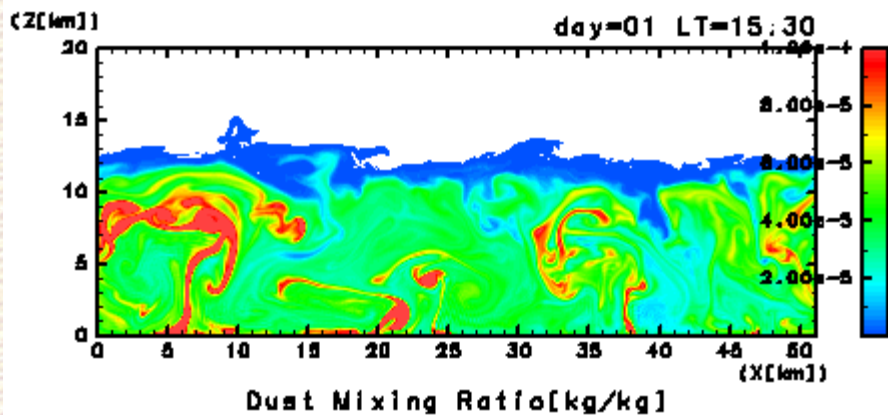
2次元雲対流モデル



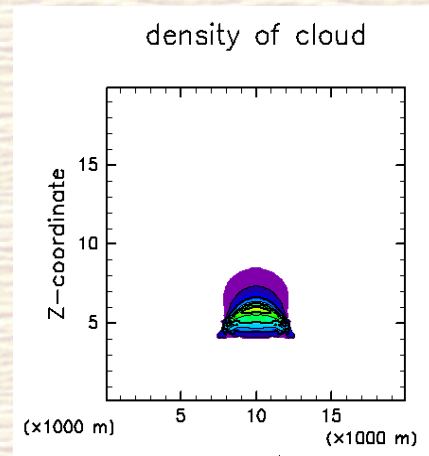
地球の湿潤対流:
中島他(1998、ながれマルチメディア)



木星の雲対流:杉山他(2008)



火星の乾燥対流:
小高他 (2001, GRL, ながれマルチメディア)

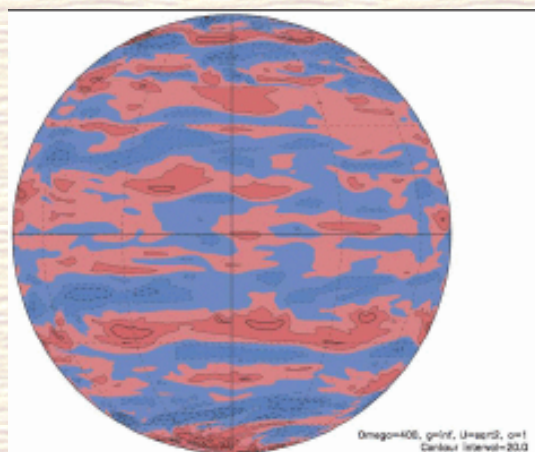
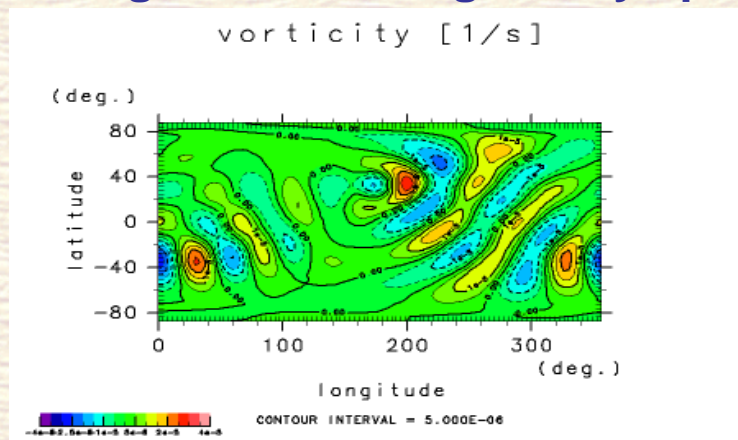


火星の凝結対流:北守(2006)

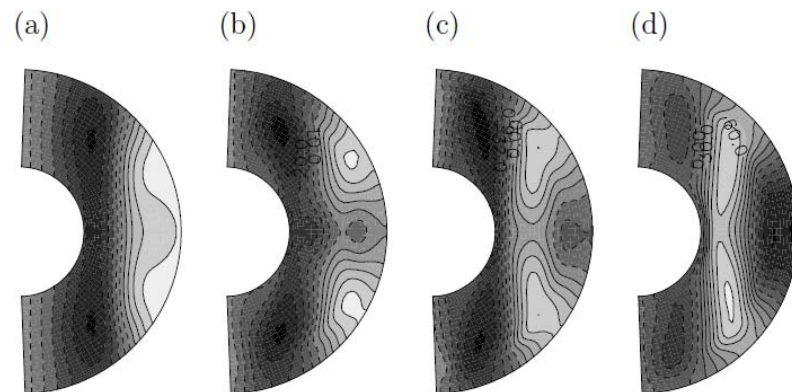
球面2次元モデル・球殻3次元モデル

階層的地球流体スペクトルモデル集spmodel

<http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>

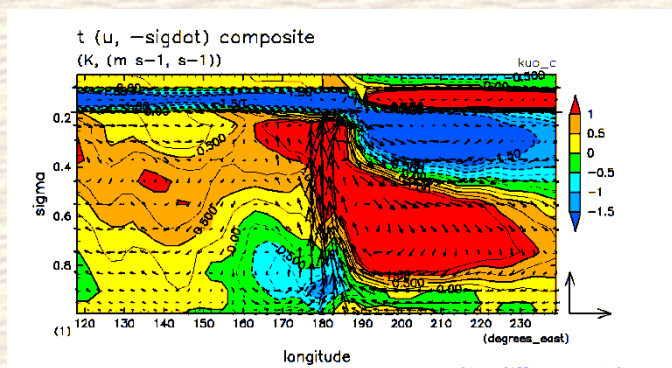


球面減衰乱流における帯状構造:
Hayashi et al. (2007, JAS)

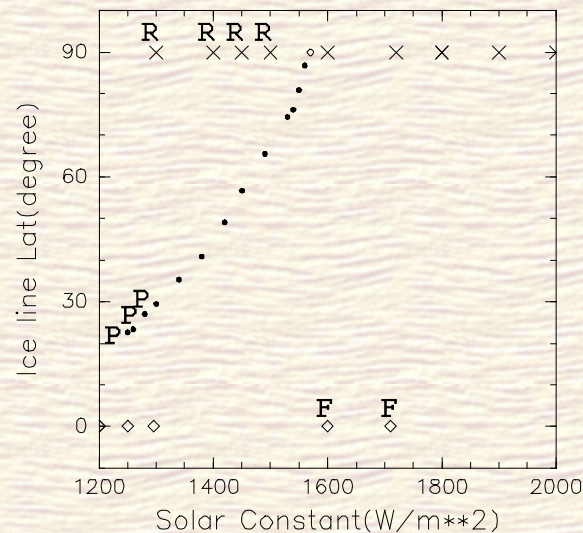


回転球殻対流における平均流生成
Takehiro et al. (2007)

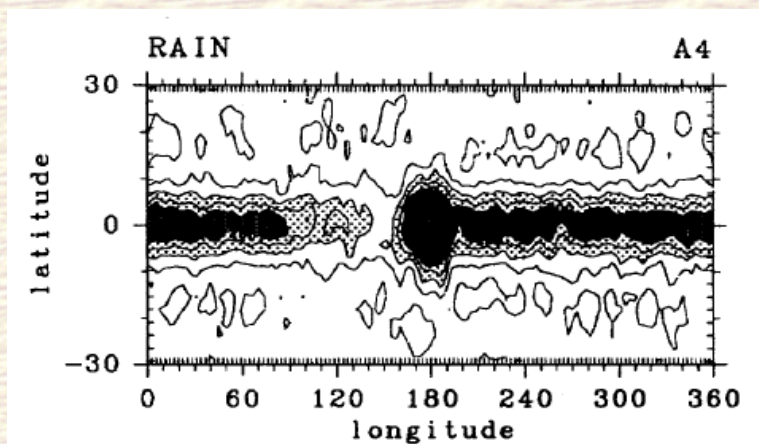
3次元大気大循環モデル



熱帯降水構造:
Yamada et al. (2008)



暴走温室と全球凍結:
Ishiwatari et al. (2007,JGR)



暖水域に対する大気の応答:
Hosaka et al. (1998,JMSJ)

dc pam による
水のある惑星大気循環実験
供回転惑星など軌道要素と気候
(on going)

やっぱり問題

■ 問題

- 膨大な知識とデータ, 複雑化するモデルへの対応
 - ◆ そもそも作るのが大変
 - ◆ 動かすのも大変
 - ◆ 相互に参照するのはもっと大変
- 伝統的作戦は人海戦術
 - ◆ 確保できる予算とマンパワーで勝負が決まる
 - ◆ いずれ限界が?
(でも以外と?長持ちした: 計算技術の進歩)