



JUICEによる木星系探査 (木星成層圏大気研究と サブミリ波分光計の観測計画)

黒田剛史¹, Paul Hartogh²,
Alexander S. Medvedev², Jisesh Sethunadh²,
笠井康子^{3,4}, 関根康人⁵, 佐川英夫⁶,
JUICE-SWIチーム

1: 東北大, 2: マックス・プランク研究所,
3: NICT, 4: 東工大, 5: 東大, 6: 京産大

JUICE木星系探査

LAPLACE(日欧)→EJSM(日米欧)→JUICE(欧)

2022年打ち上げ

2030年木星圏到達予定～2033年までノミナルミッション

表2：ミッションスケジュール。

2022年6月	打ち上げ 地球－金星－地球－地球重力アシスト	
2030年1月	木星周回軌道投入	
	木星ツアー	－エウロパフライバイ2回 －カリストフライバイ3回 高軌道傾斜角フェイズ －カリストフライバイ9回
2032年9月	ガニメデ周回軌道投入	ガニメデツアー 高高度楕円軌道周回フェイズ(1か月) 高高度(5000 km)円軌道周回フェイズ(3か月) 高高度楕円軌道周回フェイズ(1か月) 中高度(500 km)円軌道周回フェイズ(3か月) 低高度(200 km)円軌道周回フェイズ(1か月)
2033年6月	ノミナルミッション終了	

JUICE木星系探査

日本参加測器：RPGI, GALA, SWI, PEP (ハードウェア開発込)
JANUS, J-MAG (サイエンスのみ)

表1：搭載する科学観測機器.

観測装置	
JANUS (Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator)	可視分光撮像カメラ
MAJIS (Moons And Jupiter Imaging Spectrometer)	可視・近赤外撮像分光計
UVS (UV Imaging Spectrograph)	紫外撮像分光計
SWI (Submillimetre Wave Instrument)	サブミリ波観測器
GALA (GANymede Laser Altimeter)	レーザー高度計
RIME (Radar for Icy Moons Exploration)	レーダーサウンダ
J-MAG (Magnetometer for JUICE)	磁力計
PEP (Particle Environment Package)	プラズマ環境観測パッケージ
RPWI (Radio and Plasma Wave Investigations)	電波・プラズマ波動観測器
3GM (Gravity and Geophysics of Jupiter and Galilean Moons)	重力観測器
PRIDE (Planetary Radio Interferometer and Doppler Experiment)	惑星間電波干渉・ドップラー実験

[木村ほか, 2013, 遊星人]

講演者はSWI(サブミリ波分光計)のCo-investigatorなので
その観測対象の話しかできません...

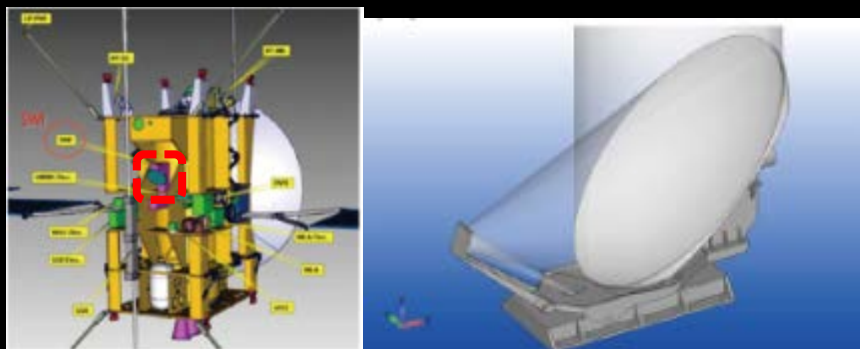
SWI: Submillimetre Wave Instrument サブミリ波分光計

ヘテロダイン分光計

600 GHz (~530 – 600 GHz)

1.2 THz (~1.075 – 1.275 THz)

高波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^7$)



日本担当部 アンテナ主鏡、副鏡、アクチエータ

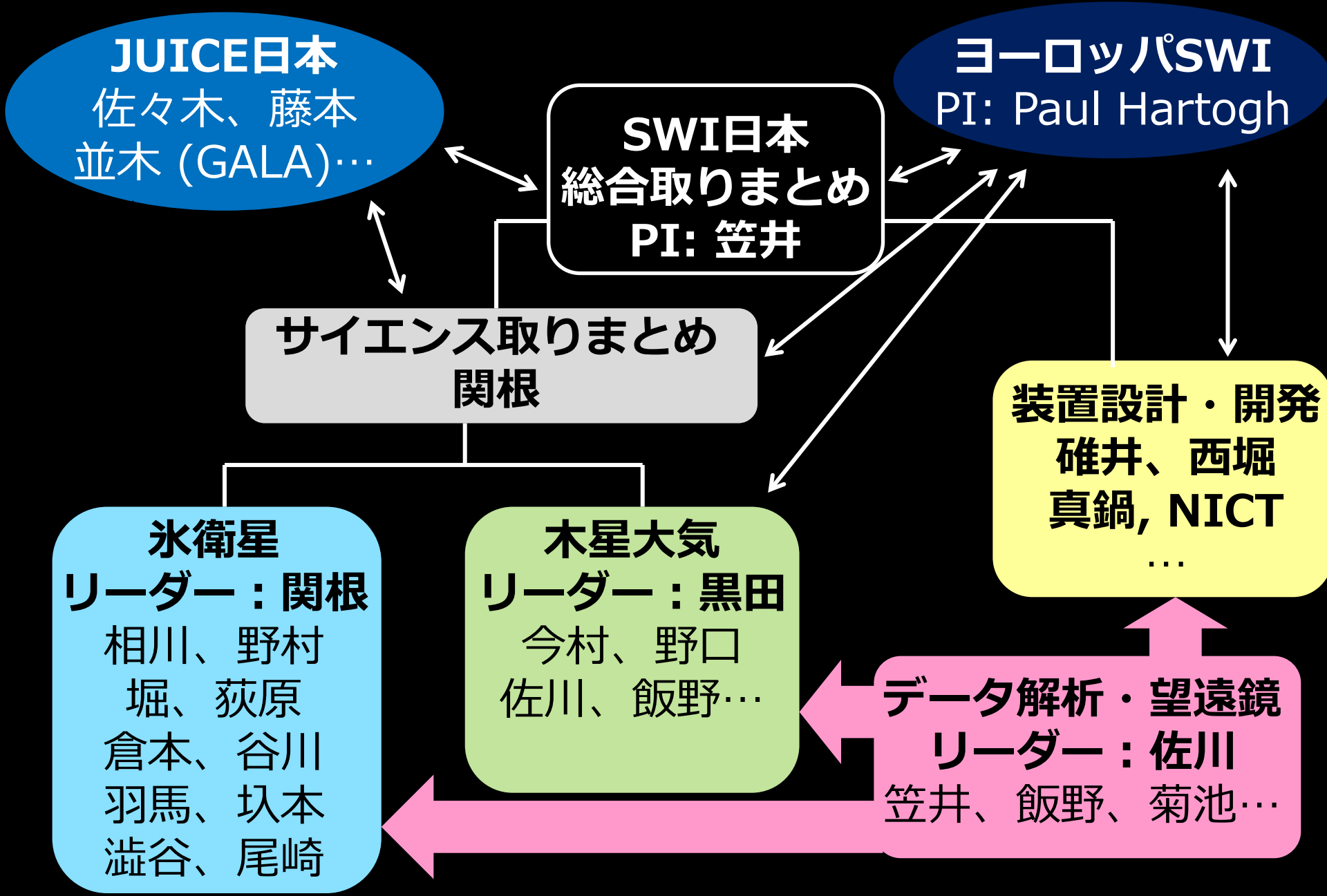
⇒ 気体分子の検出・定量
同位体比、オルト・パラ比
ドップラー効果、熱放射

木星成層圏
ダイナミクスと
大気化学

エウロパ
プリューム・希薄大気
化学組成・噴出過程

カリスト、ガニメデ
希薄大気
化学組成・同位体

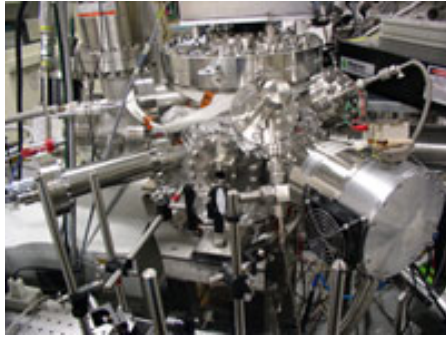
SWIサイエンス + 開発体制



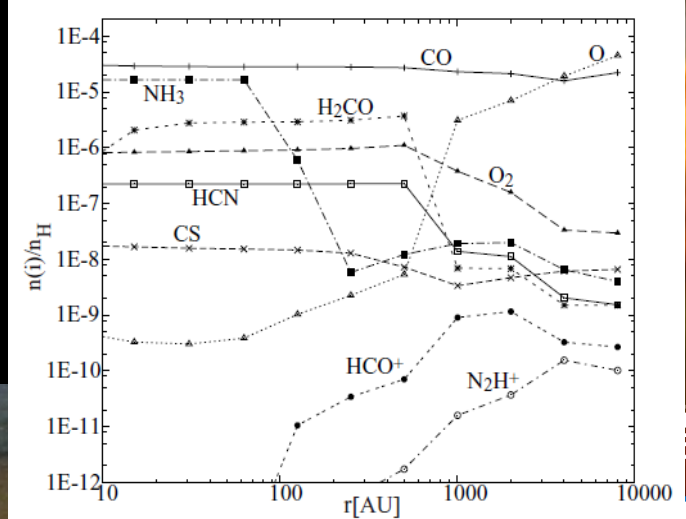
氷衛星 1: 木星系氷物質から初期太陽系を探る

• カリストの希薄大気の化学・同位体組成

$H_2O:D/H$ & $^{18}O/^{17}O/^{16}O$; $CO:^{13}C/^{12}C$; NH_3 & $HCN:^{15}N/^{14}N$



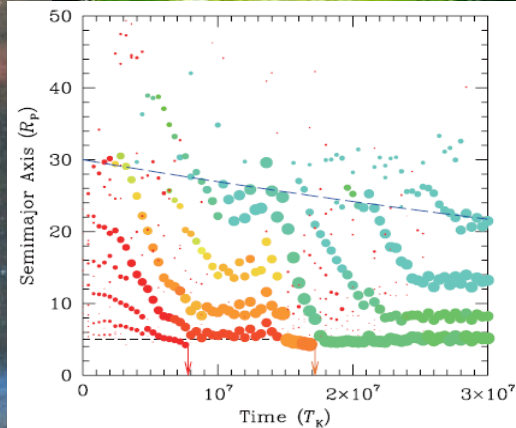
北大低温研:
氷実験装置
周木星円盤外
縁での氷凝縮



原始惑星系円盤の化学進化
モデル (Aikawa et al., 1999)

N体衛星形成
表面進化

(Ogihara & Ida 2011;
Sekine et al., 2011)



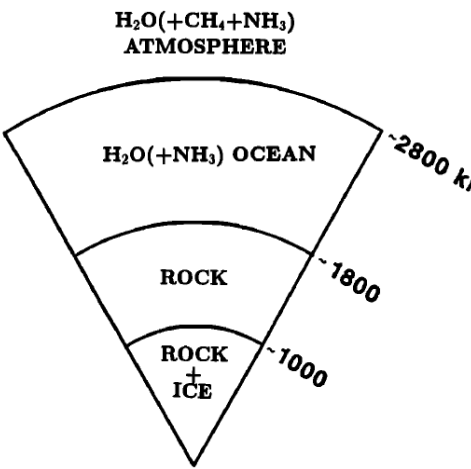
問題を解いて物理・化学量
を抽出できるか

原始円盤から衛星表面まで: 化学をシームレスに
土星系/小天体探査、円盤観測とも相補的に

氷衛星2: 表面/プルームからハビタビリティを探る

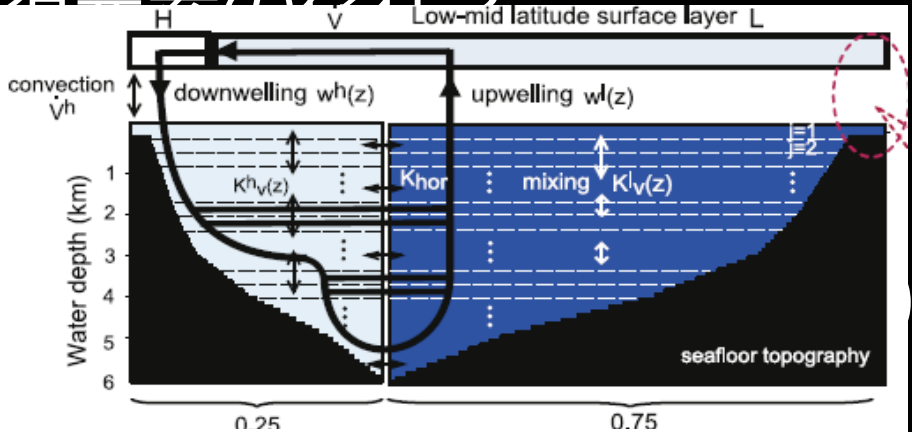
- エウロパ内部海のC, H, O, N, S 分子検出・酸化還元状態 : $\text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{NH}_3$

生命必須二要素の存在?



集積
鉱物
付線
Bottom, 1
イオ、
非生物

巨大氷衛星の元素分配
理論と実験



各過程の実験と定式化
+ 海洋物質循環モデル
(Ozaki & Tajika, 2013)

極限環境 (>1000 bar, >300°C) の実験データ
地球化学との連携、火星や他天体へも

木星成層圏：惑星気象学と進化

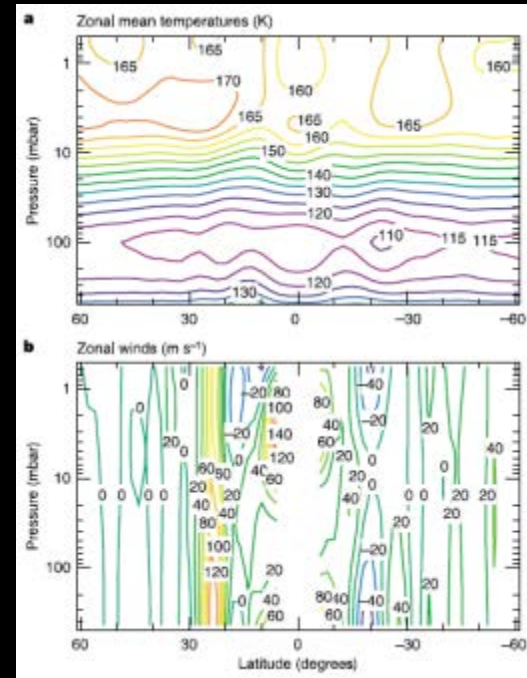
Cassini/CIRS observation
[Flasar et al., 2004]

大目標

- 比較惑星気象学
- ガス惑星 (恒星) の進化の理解へ (一般化)

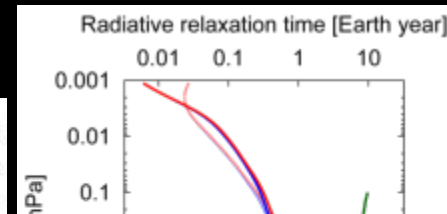
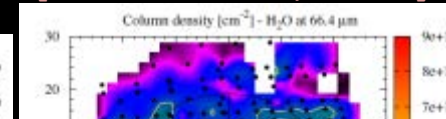
探査項目

- 成層圏のダイナミクス (QQO を含む) と放射過程を観測：対流圏や熱圏との相互作用
- プロキシ分子 (同位体、オルト・パラ、微量成分) の空間分布と時間変動
- 水の起源と輸送



Timescale of radiative relaxation
[Kuroda et al., 2014]

Water column density
by Herschel/PACS
[Cavalié et al., 2013]



GCM simulation [Medvedev et al., 2013]

Meridional/
vertical
circulation

Zonal wind
and its
acceleration

Temperature



GCM + 光化学 + 微物理モデル
系外惑星観測や大気モデル化へ



木星大気科学： その研究の意義

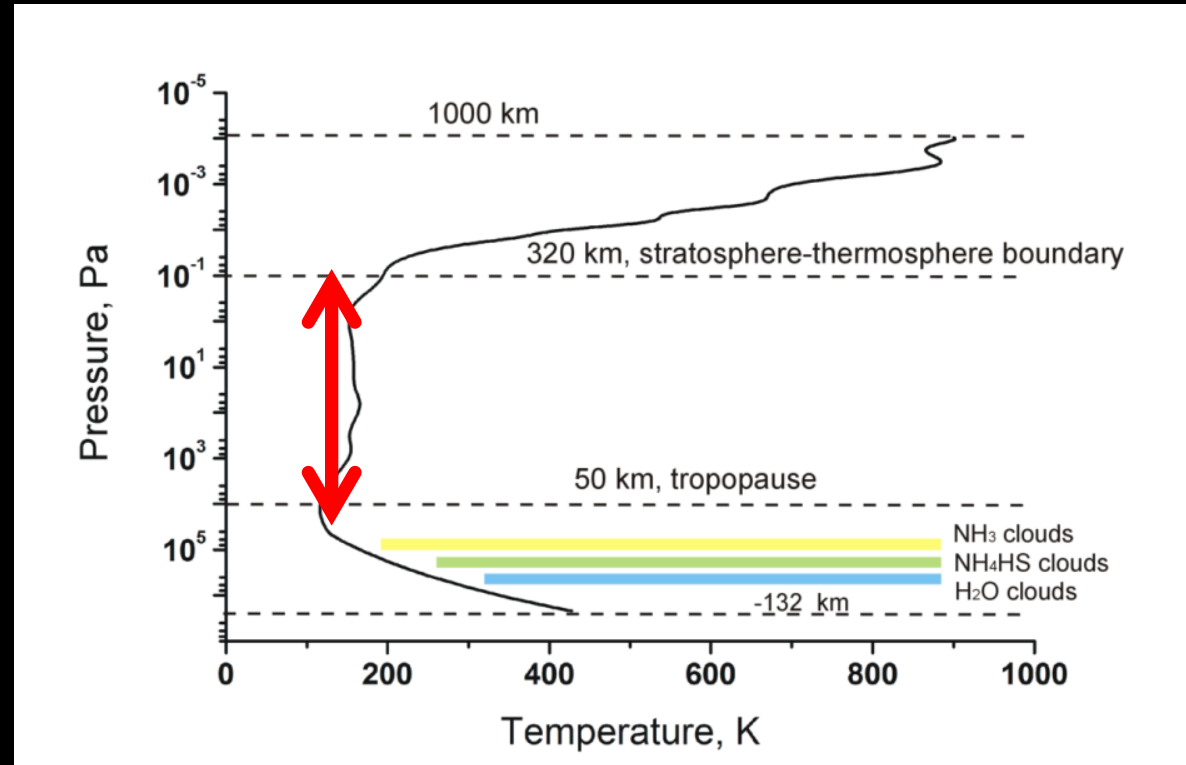


- 木星を初めとする巨大ガス惑星の大気は、惑星大気環境の形成・進化というものを地球型惑星大気とは異なった視点でより普遍的に理解して行く上で(そして同時に、個々の惑星に特有の物理パラメーターを明示する上で)重要不可欠な研究対象である。
- また、惑星科学が太陽系内の範疇を超えて系外も含めた惑星大気を取り扱う日が今まさに近づきつつあるが、その過程で最初に理解が要求されるのは木星型系外惑星である。これは太陽系内のガス惑星の大気を理解せずして達成できるものではない。

木星の大気構造

Galileo Probe観測の木星大気鉛直構造

- 熱圏(Thermosphere)
($<10^{-3}$ hPa)
- 成層圏(Stratosphere)
($10^2 \sim 10^{-3}$ hPa)
- 対流圏(Troposphere)
($10^{4-5} \sim 10^2$ hPa)
 - 雲層が存在
 - 内部熱源による加熱効果



[Seiff et al., 1998]

JUICE-SWIのターゲットは成層圏の物理化学プロセス
(JUNO/MWIは対流圏がターゲットなので、それとも相補的)

木星成層圏の大気力学について

レビュー+α

An intense stratospheric jet on Jupiter

(木星の激しい成層圏ジェット)

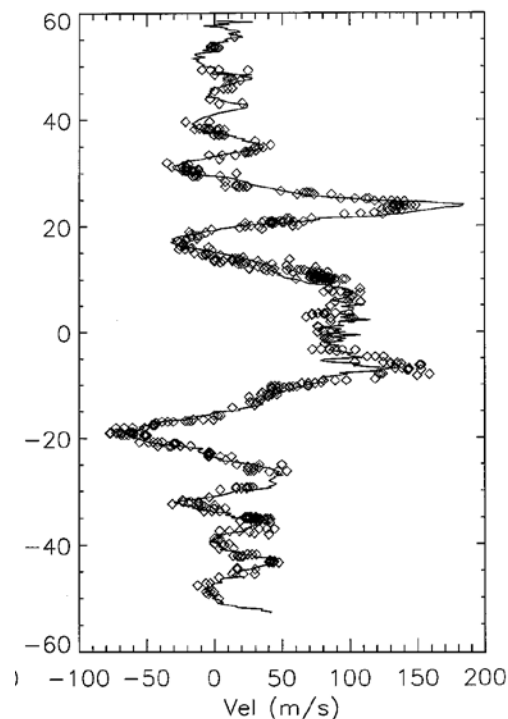
by F.M. Flasar et al., Nature, 2004

～比較惑星気象学の視点から見る木星大気力学～

観測・リトリーバル

- Cassiniの木星スイングバイの時のスペクトル(2000~2001年)
(CIRS: Composite Infrared Spectrometer, フーリエ分光器)
- これを使えば高い鉛直・水平分解能での温度マッピングが可能、
そして雲層の上の風速も出せる
- 中間赤外のスペクトル($600 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$)を使用
温度リトリーバルにおける波長分解能: 3 cm^{-1}
(CIRSのスペクトルの分解能は $0.5 \sim 16 \text{ cm}^{-1}$)
- 木星最接近の直後に取得したスペクトルを使用、空間
分解能は衛星直下点で 2.4° (緯度および赤道上経度)
- 温度の鉛直分布は 'constrained inversion with strong
low-pass filtering' による
- $80 \sim 400 \text{ mb}$: collision-induced transition S(1) line of H_2
($\sim 600 \text{ cm}^{-1}$)
 $1 \sim 20 \text{ mb}$: CH_4 バンド吸収($\sim 1300 \text{ cm}^{-1}$) から温度を求めた
- 東西風速(経度平均)は雲層のトラッキング風速[Simon,
1999] (右図)を高度 500 mb の境界条件として(緯度分解
能 3° にスムージング)、温度風の式から求めた

雲トラッキング風速
[Simon, 1999]
線はVoyager, 菱形は
ハッブル宇宙望遠鏡から

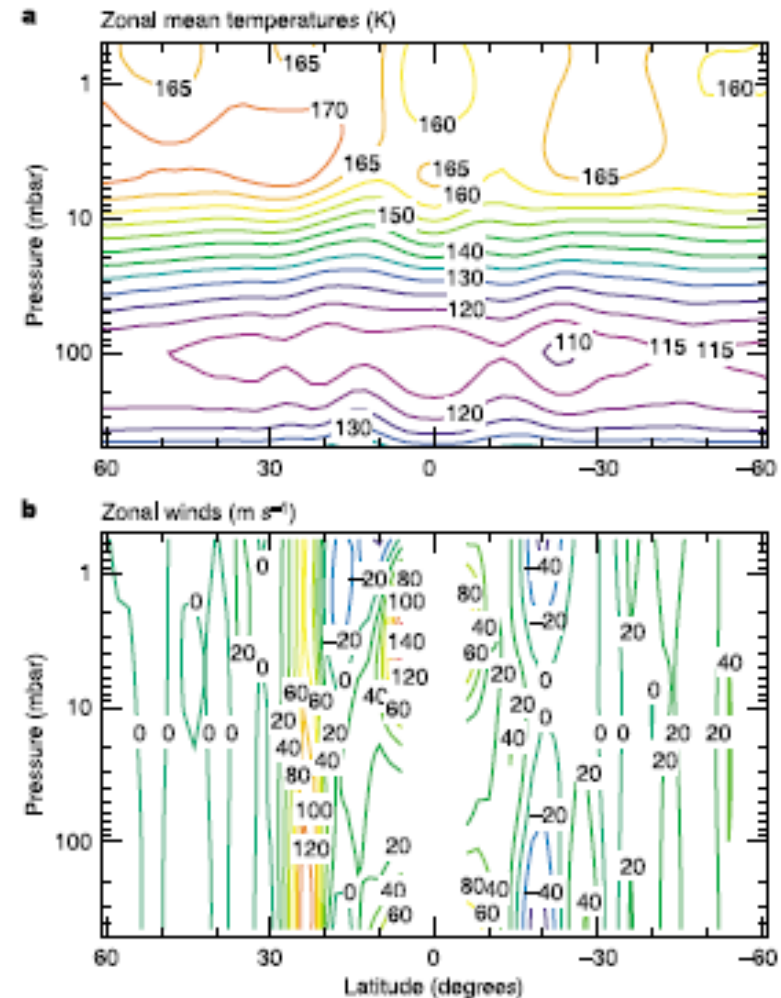


温度と東西風速の結果

温度風の式

$$\left(f + \frac{2\bar{u} \tan \phi}{a} \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{g}{aT} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \phi}$$

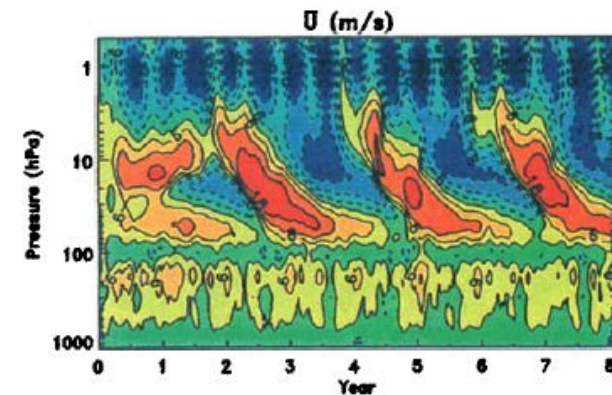
- 温度風の風速は南北温度傾度に依存する、赤道域では誤差が大きくなるので使えない
- 上部対流圏では風速は高度とともに減少、これはVoyager観測[Gierasch et al, 1986]と整合
- さらに上層(成層圏)では、北緯23度の西風ジェットはさらに弱まり、南緯18度などでは東風ジェットがまた強くなっている
- 100mbと1mb高度では、赤道域の温度は南北緯度10~15度より低くなっている
- 逆に4~20mbでは赤道の温度は5Kほど高い
- よってそれに付随して上部対流圏の風速が遅くなる場所(低緯度)では、東西風速がその上の成層圏で強くなる(高度4mbで最大140 m/s、雲層赤道域風速と同等)
- この温度分布はスムーズ化されているので、おそらく実際には風速はもっと強いのではないか



準4年振動(QQO)

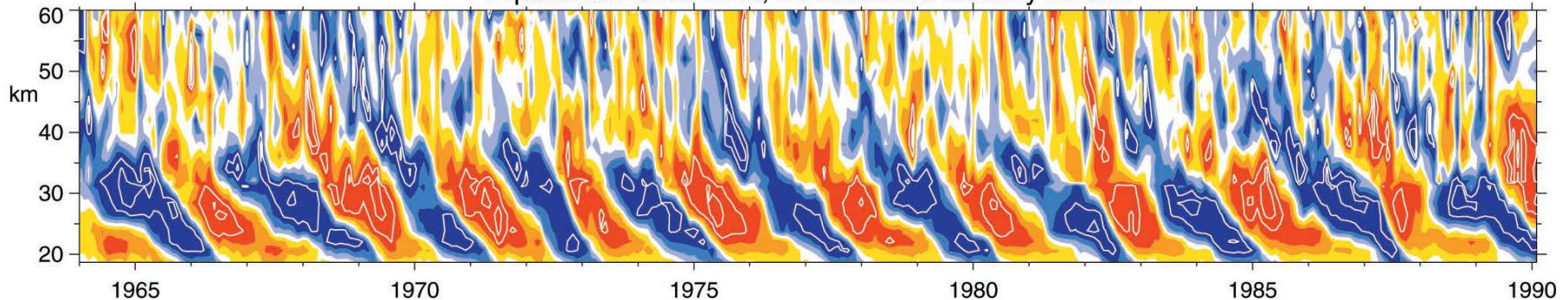
- 地上観測との比較では、低緯度の温度場はdynamical forcingの応答である
- 鉛直分解能が悪いと言っても、20年以上観測してきて赤道域成層圏温度が4~5年周期で振動しているのはわかっていた
- Leovy et al. [1991]はこの現象をQQO (quasi-quadrennial oscillation, 準4年振動)と名付け、地球のQBO (quasi-biennial oscillation, 準2年振動)と類似のものではないかと主張

地球QBO(成層圏赤道東西風風向の変化)のGCMシミュレーション
[Takahashi, 1999]



地球QBO(東西風風速)の観測 [Baldwin et al., 2001]

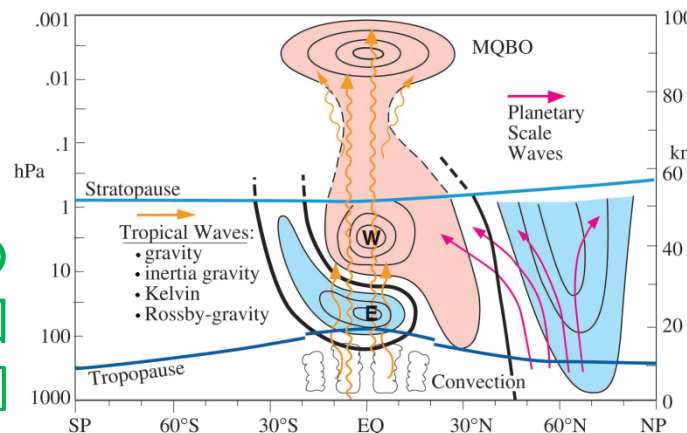
Equatorial Zonal Wind, Deseasoned Monthly Means



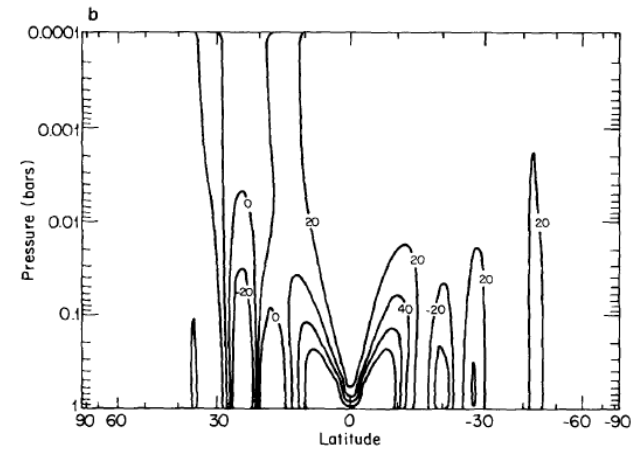
準4年振動(QQO)

- 地球QBOのメカニズム：
経度平均の場は鉛直伝播の波動からの応力により変化し、西向き／東向き位相速度を持った波が振動に寄与する
- 木星の観測された温度分布(分解能は悪いものの)をもとに組まれたモデリングは、CIRS観測と定性的に整合する温度と東西風の空間構造を再現している
- しかし、東西風反転の鉛直スケールと温度の南北コントラストは定量的にはCIRS観測の2倍程度

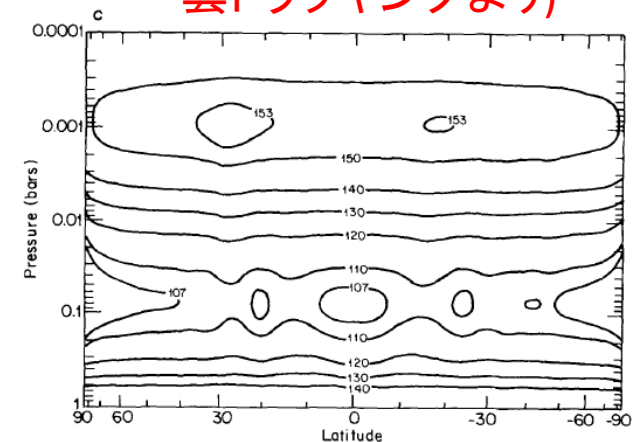
地球QBOメカニズムの
模式図
[Baldwin et al., 2001]



2次元線形放射力学モデルによる東西風(上)と温度(下)の計算結果
[Conrath et al., 1990]



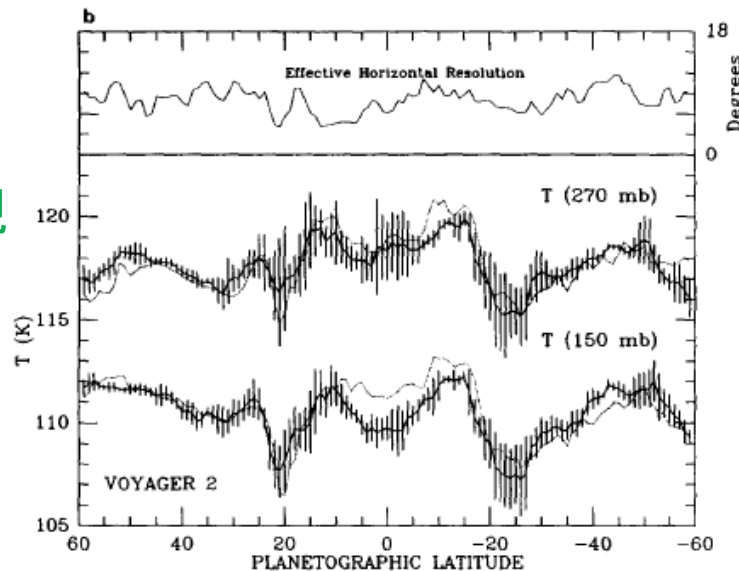
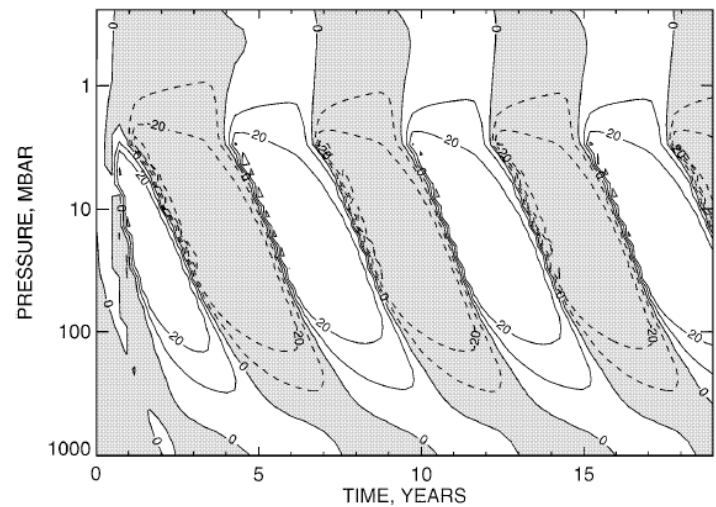
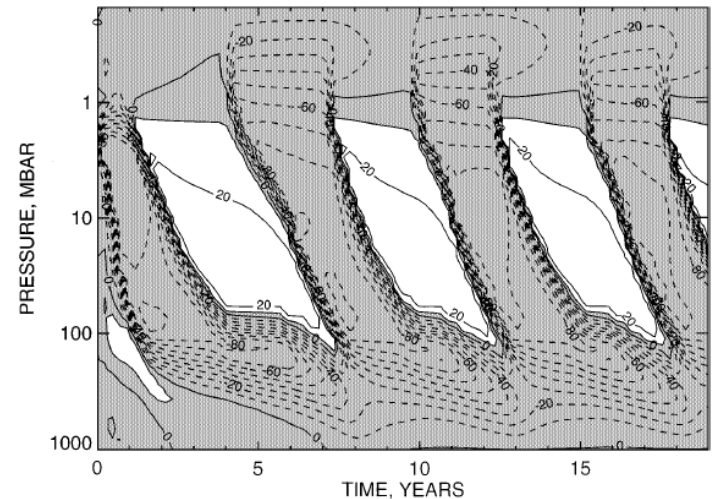
(下端の風速境界条件は雲トラッキングより)



準4年振動(QQO)

- モデルは振動的ふるまいは上部対流圏にも及ぶことを示し、新しいデータもそれを実証している
- 論文の図1は上部対流圏の赤道域温度は近隣の緯度より5Kほど低いことを示している。これは1979年のVoyager/IRISによる観測(~2K)よりも大きい

木星QQOのシミュレーション(上:定常波・ロスビー波による加速、下:重力波による加速) [Friedson, 1999]



Voyager2/IRIS観測の温度緯度分布(点線はVoyager1/IRIS) [Gierasch et al., 1986]

赤道振動をもたらす波動の起源は？

- プラネタリー波？
重力波：CIRSの空間分解能よりも小さいスケールの波？
- 波動は運動量輸送、東西風の調節において重要
(赤道に限らず全球で、地球との類似性において)

TEM (Transformed Eulerian-Mean) 方程式

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \frac{\nabla \cdot \mathbf{F}}{\rho_0 a \cos \phi} + \bar{v}^* \left[f - \frac{\partial(\bar{u} \cos \phi) / \partial \phi}{a \cos \phi} \right] - \bar{w}^* \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \bar{X}$$

南北循環による強制力

Subgrid forcing

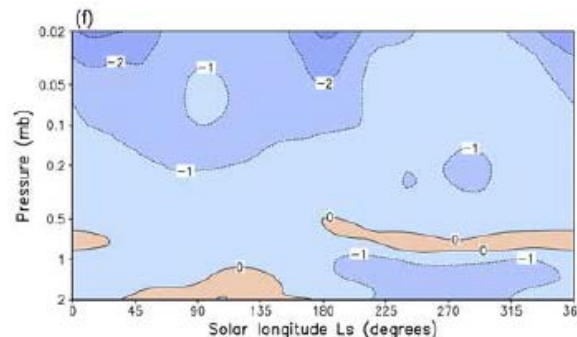
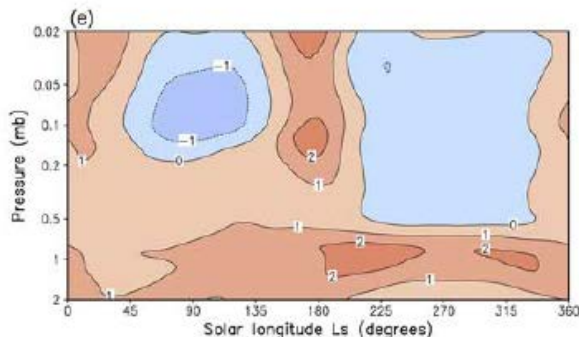
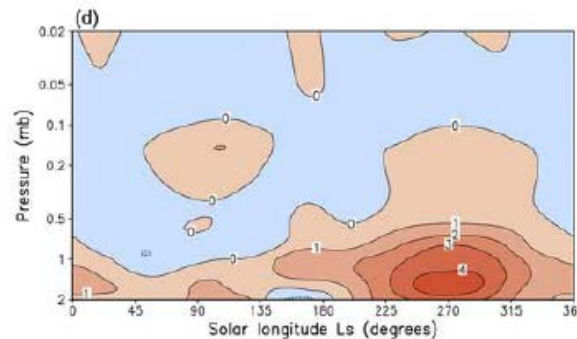
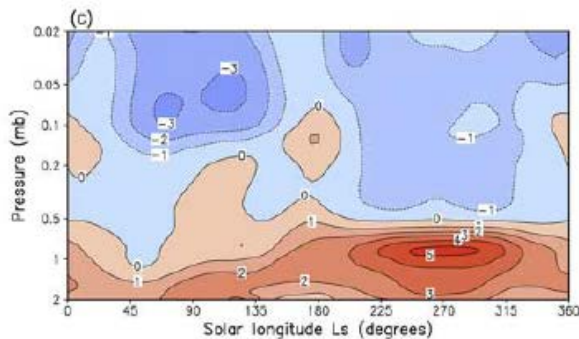
EP-flux divergence

(重力波など)

(波による強制力)

鉛直循環による強制力

(木星には赤道をまたぐような循環はなさそう)



参考:火星の赤道半年振動における波動の東西風加速に対する寄与
(c)全波動要素の合計、
(d)定常波、(e)熱潮汐、
(f)ケルビン波
[Kuroda et al., 2008]

対流圏波動

- 南北緯度15度以内ではQQOに関連する波動活動を示唆する縞構造
- しかし赤道から離れると、経度方向の変動が見られる:
対流圏ではlong trains of regularly spaced features (?)があり、その構造は内部に対し定常あるいはゆっくり動いている感じ(その場での高速な東西風速に関わらず)
- 木星や土星の対流圏にこのような定常波のような構造があることは、Voyager IRISや地上望遠鏡観測でも確認されている
- 波の起源は推測の域を出ない:
深部に帯状でない何らかのforcing構造がある? あるいは東西風速が小さい可視雲層に起源がある?

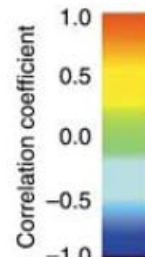
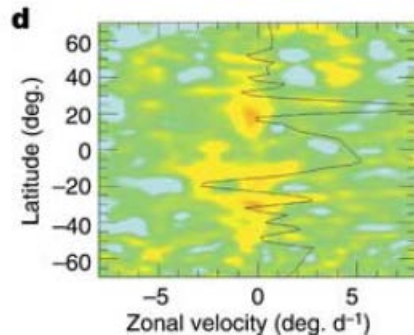
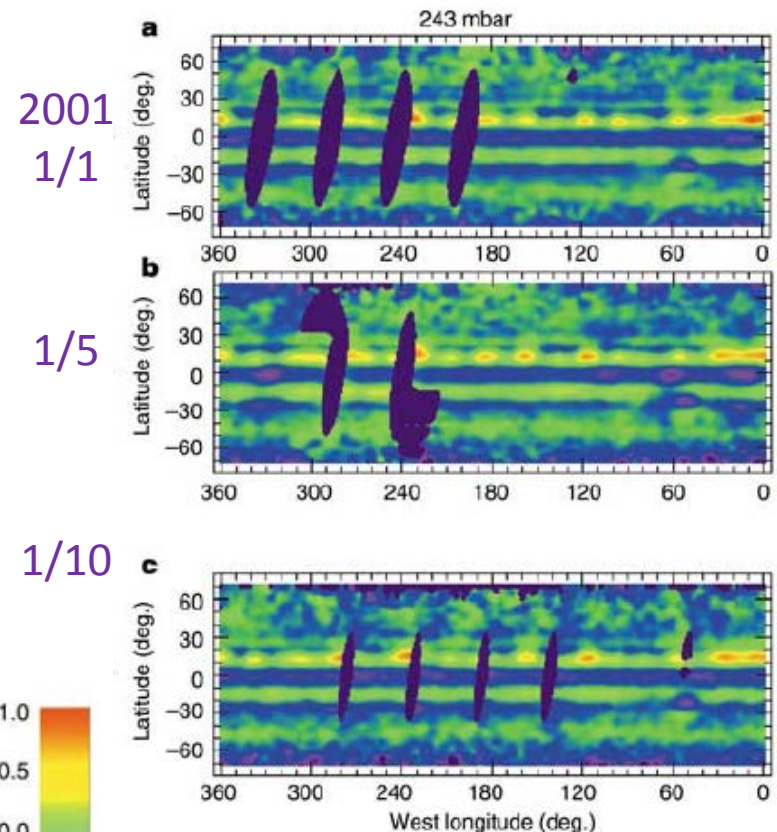


Figure 2:

木星大気温度の緯度・経度分布(水平分解能は赤道付近で2.4~3.5°)

対流圏上部(243mb)
(温度範囲は106~140K)



1/1と1/10の温度相関東西速度と時間平均風速場

成層圏波動

- やはり縞構造はあるが、特定の緯度に固定されておらず、動きがある
- これまでの地上観測からは水平の動きの upper limitしか見ることしかできなかった
- CIRSデータから初めて見えたものは、特定緯度帯での西向き drift (特に南緯25度、北緯35度の warm spot の動きがわかりやすい)
- 両緯度帯における東西風速はこれらの drift の速度とは明らかに違う
- 温度相関からも明らかに西向きに動く波動の存在が示唆されている、特に南半球
- ロスビー波？ 対流圏との相関？ (特に北緯15度辺り)

1/1と1/10の
温度相関東西速度
と時間平均風速場

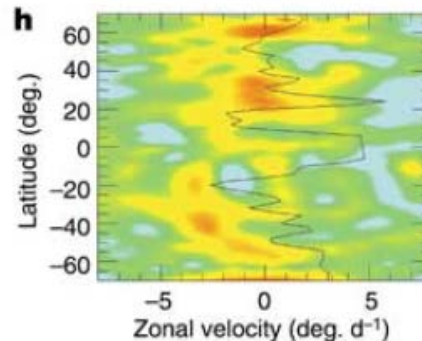
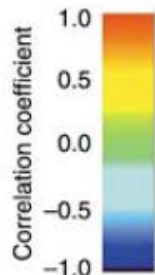
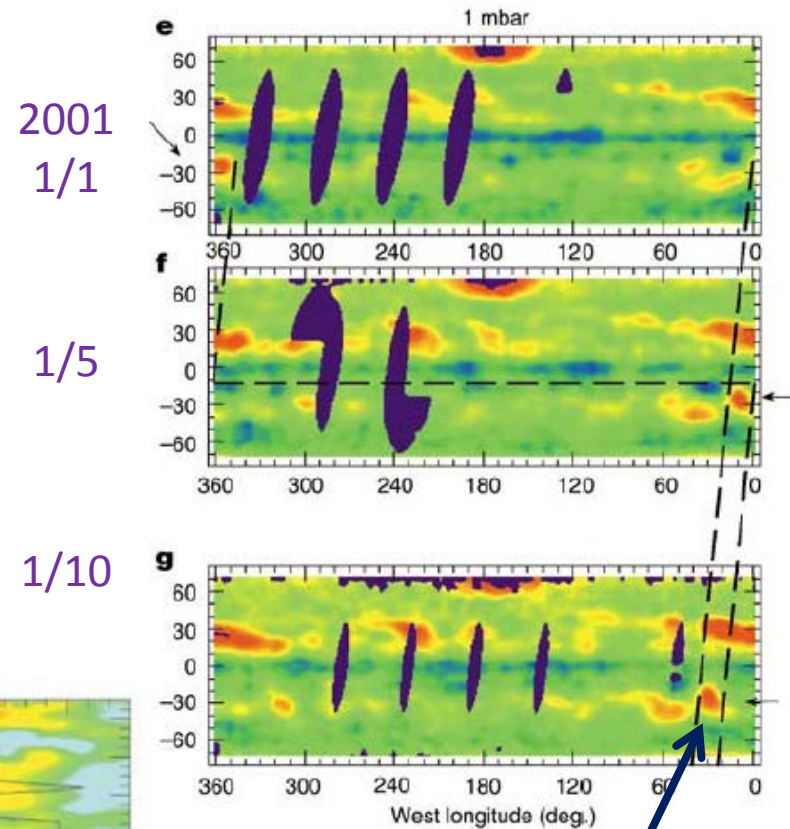


Figure 2:

木星大気温度の緯度・経度分布 (水平分解能は赤道付近で2.4~3.5°)

成層圏中部(1mb)
(温度範囲は140~180K)



成層圏温空気塊の
westward drift
(3.9 degrees/day, 50 m/s)

成層圏波動

- 成層圏における西方向の移動波の起源は不明
- 鉛直方向に伝達する波は東西位相速度を保存するはず、よってパッと見では見えない西向きに動く構造が対流圏にある？
- 個々のスペクトル要素の伝達を詳しく見るような作業が必要だろう
 例: Voyagerによる土星上部対流圏の赤外観測の解析[Achterberg and Flasar, 1996]

私も(火星で)似たような解析はやった(プラネタリー波の振幅、refractive index, EP-flux) [Kuroda et al., 2009]

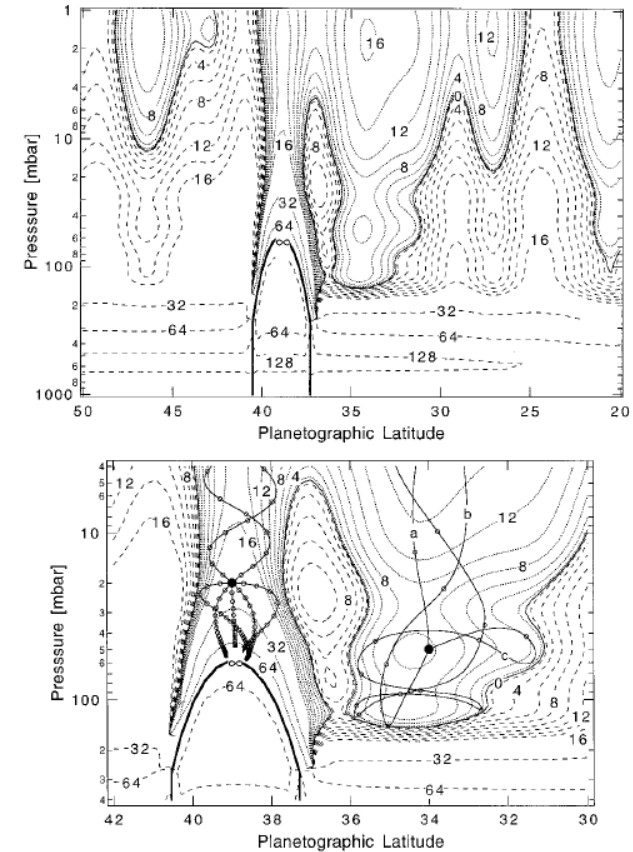
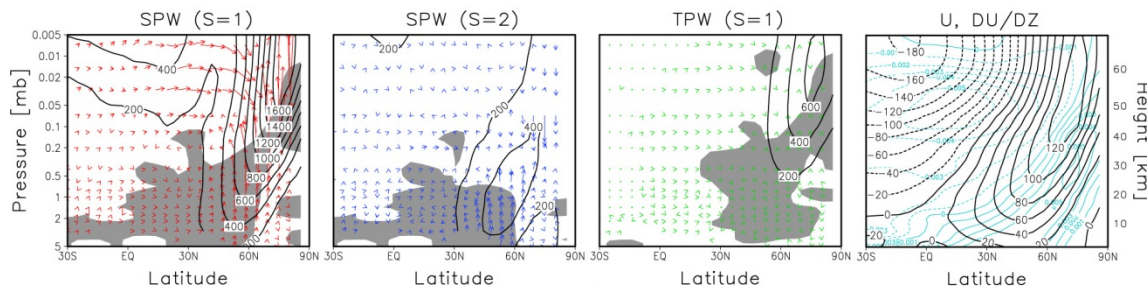
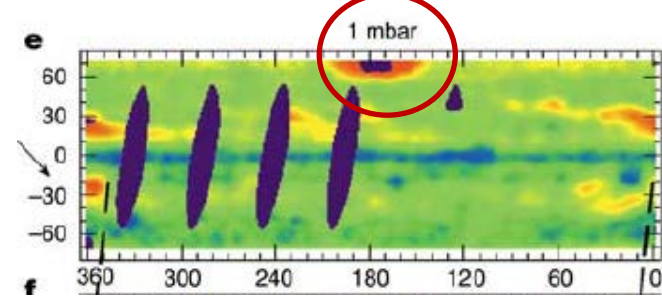


FIG. 8. Results of raytracing calculations for $\pi_0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$, $H = 10$ scale heights, $z_0 = 270 \text{ mbar}$, $k = 2$, and $\omega = 0$. (Top) Contours of the index of refraction ν . The thin solid line is the contour for $\nu = 0$, the dotted lines are contours where $\nu^2 > 0$ (ν real), and the dashed lines are contours where $\nu^2 < 0$ (ν imaginary). Contours are labeled with $|\nu|$. Contour level are $|\nu| = 0, 2, 4, \dots, 14, 16, 32, 64, 128$. The thick solid line is a critical surface, where $|\nu| \rightarrow \infty$. (Bottom) As (top), with paths of rays emitted from two sources superimposed (thick solid lines). The open circles mark positions along the rays at one-week intervals.

成層圏北極のhot spot

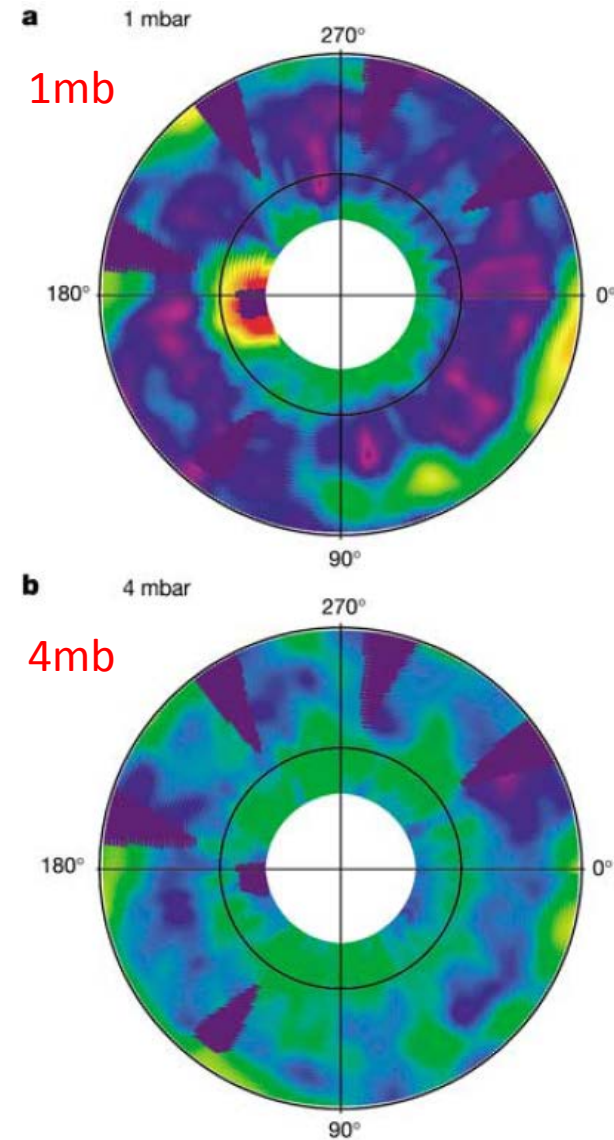


- Fig. 2の1mbの図にて、北半球高緯度(北緯65度、経度180度)に明らかなhot spotが見られる
- 地上望遠鏡観測によると、オーロラスポットと強い赤外熱放射が見られる場所は一致し、その場所の緯度・経度も固定されているよう
- 振動的なX線放出、特異な紫外線放出も同じ場所から
- 熱源: 20 μ bar高度かその上に沈殿する荷電粒子? ジュール熱?
- Hot spotから木星の磁力線を辿ると、30木星半径よりも遠くにある磁気圏外に起源が? とにかく中性大気への影響は大きい
- 力学的バランスが成り立つならば、hot spot内の高温大気は高圧で、時計回りの渦を持っているはず
- hot spot 近傍の温度傾度は緯度5度あたり15Kにも達し、温度風の式から渦内での風の鉛直シアはスケールハイト(~27km)あたり30m/sにも達する
- カッシーニの紫外イメージャによる連続観測では、大きな黒い卵形の構造が同じ場所にあり(2000年10月)、それは時計回りの回転を持ち、それから東に移動して形が崩れた。これと熱的hot spotとの関連性は不明

成層圏北極のhot spot

- 北極中心の図としてこれを見してみる (Fig. 3)
- Hot spotの深さはわかっていないが、CIRSデータからその下限高度は示せる
- 温度のリトリーブは、それがとても暖かい場合はより高い高度からの熱放出の影響を受けている可能性がある
→このhot spotが1mb高度にあるとは断定できない、もっと上かもしれない
- 1mbから1スケールハイトほど下に下がると(4mb)、hot spotは見えなくなる。
→hot spotの下限高度が4mbよりも上だということは断定できる

Figure 3:
北極域の成層圏温度
周縁は北緯30度、
スケールは160~185K



長期的な変動は？

レビュー+α

Jupiter's atmospheric temperatures:

From Voyager IRIS to Cassini CIRS

(木星の大気温度: Voyager IRISからCassini CIRSまで)

by A.A. Simon-Miller et al., Icarus 180,

98-112, 2006

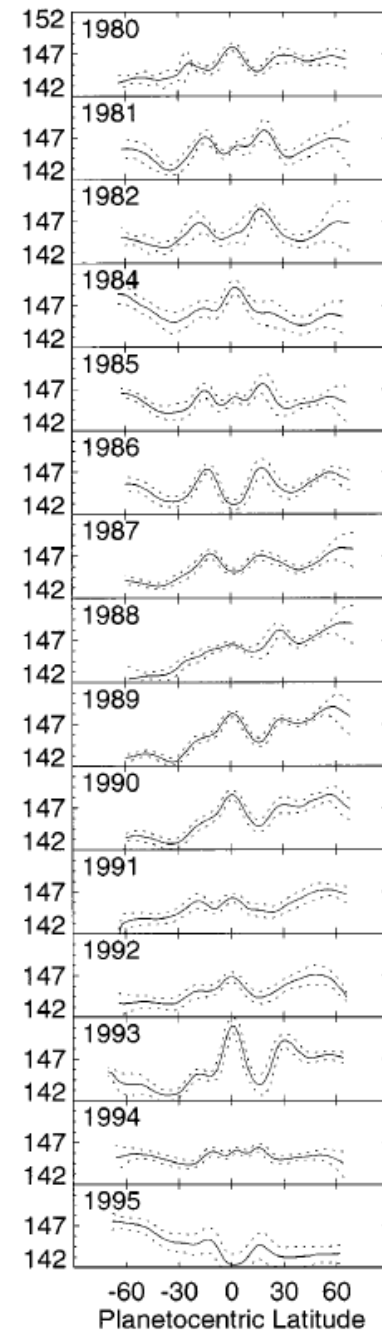
**～周回船&地上望遠鏡からの
木星上部対流圏・成層圏の観測～**

NASA地上望遠鏡

Infrared Telescope Facility (IRTF)

- 鉛直分解能、特に成層圏のそれは周回船観測よりずっと劣る
- それでも木星大気の興味深い季節変動・interannual変動を観測し、時間的に衛星観測の間を埋めることに役立っている
(右図:赤道域は準4年振動が見える?)
- この論文ではVoyager (1979年)とCassini (2000年)の間の20年間の望遠鏡観測データを用いて、この間(1.7木星年相当)の季節・経年変動を見る
- 成層圏の温度は CH_4 $7.6\mu\text{m}$ (1306cm^{-1})の ν_4 バンドから(1994年より前と後でやり方が微妙に違う?)
- 対流圏の温度は $18.7\mu\text{m}$ (535cm^{-1})で H_2 collision-induced absorptionを見た

1980年~1995年の
温度観測
[Friedson, 1999]



解析と温度場

- 対流圏温度: 水素・ヘリウム分子の collision-induced S(0), S(1)吸収(354~600 cm^{-1})を使用 水素のモル比は0.86
 - Voyager IRISでは320~430と520~600 cm^{-1} を使用(雲の影響を避ける)
 - Cassini CIRSでは600~690 cm^{-1} を使用
- 成層圏温度: メタン ν_4 バンド(1300 cm^{-1} 周辺)を使用(IRIS, CIRSともに) 相関 k を使って計算 メタンのモル比は 1.8×10^{-3}

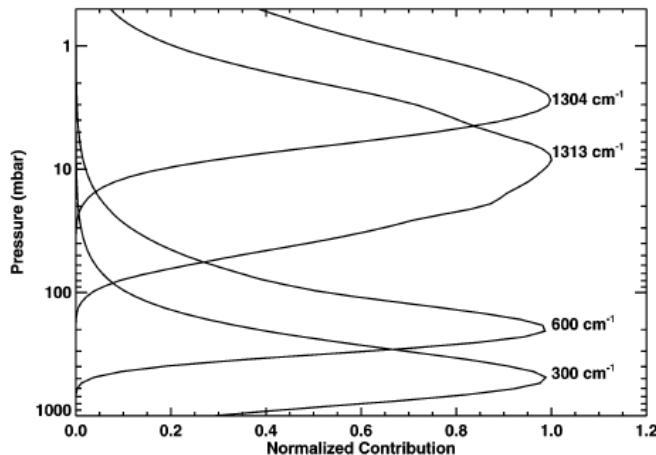
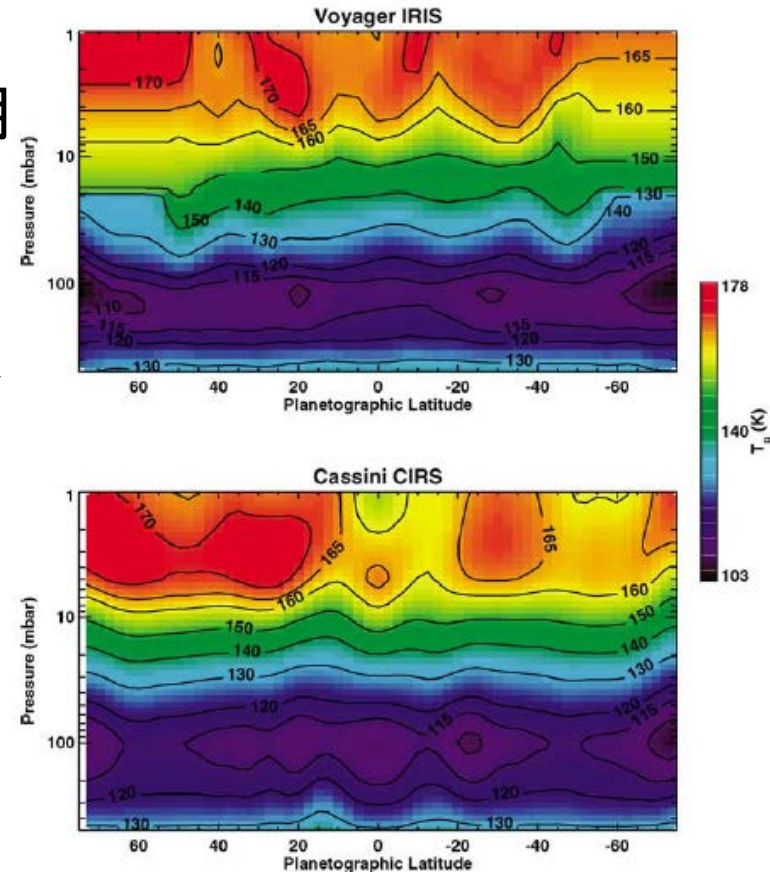


Fig.1:
観測波長と高度

Fig.2: 温度リトリバル結果
IRISでは成層圏の緯度55度より極側はデータがないため等温に外挿、両データとも20~100mbは線形内挿



温度風

- 地衡風と静水圧平衡を仮定して温度場から東西風速を求める→
 R (木星の気体定数) = $3745 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
 f :コリオリパラメータ
- 風速の下側境界条件はそれぞれの測器の雲トラッキングから求められたもの(既出)を使用
- 赤道域(緯度5度以下)では f が0に近づくため誤差が大きくなるので計算しない

$$u_T = -\frac{R}{f} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right)$$

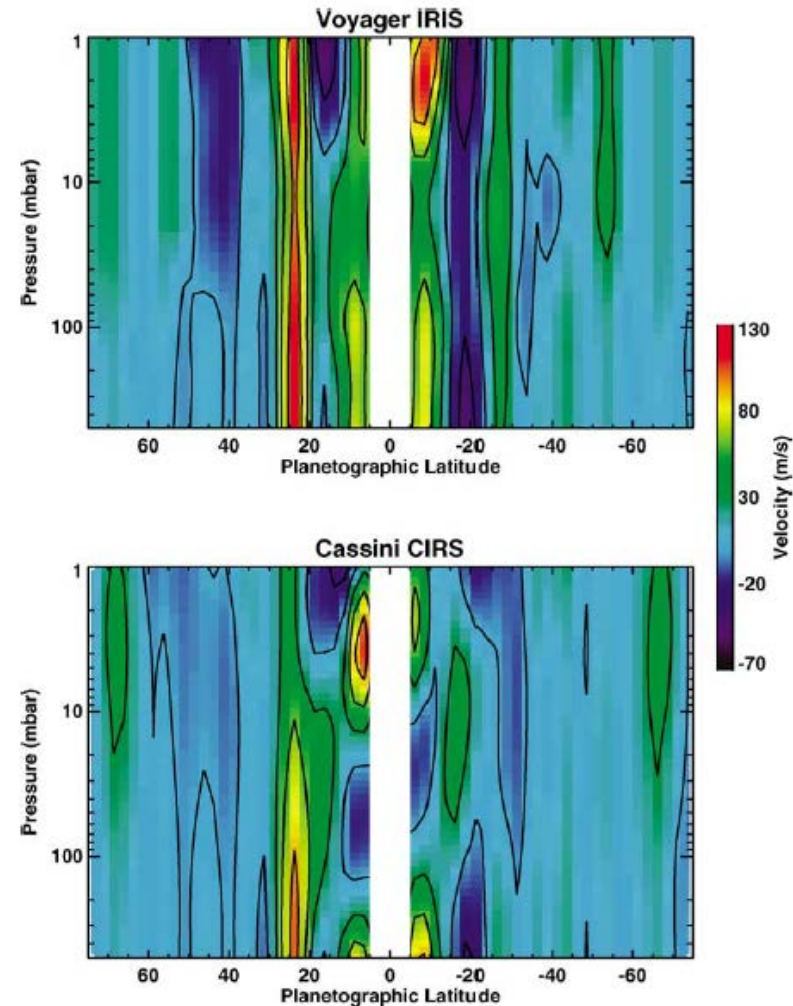


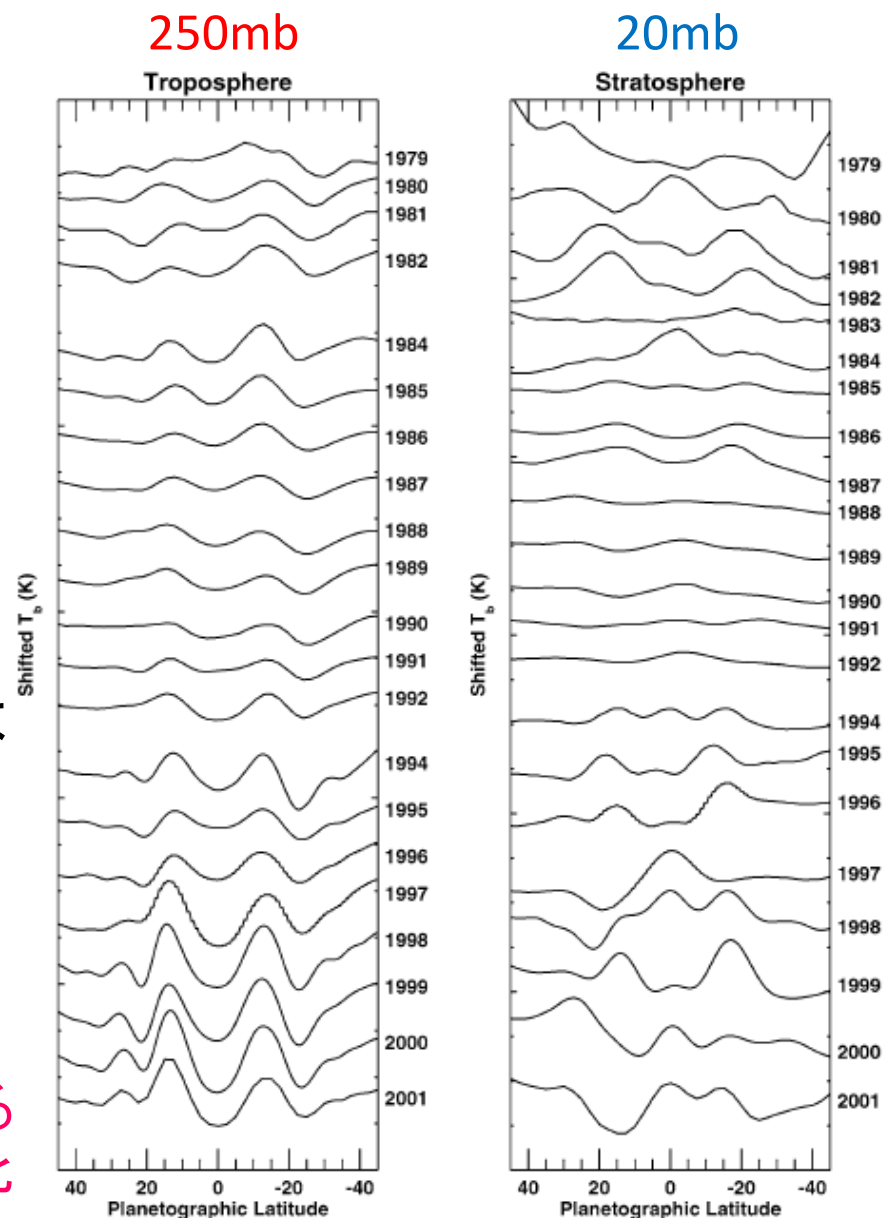
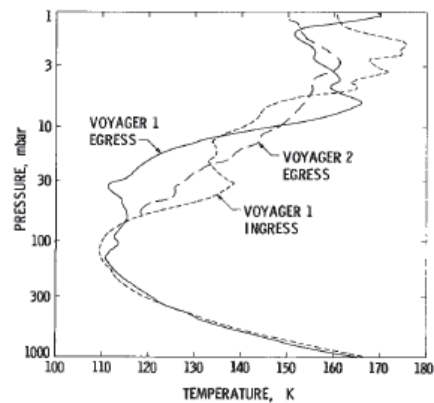
Fig.3:温度風から導出された東西風速

地上望遠鏡による温度観測

- 導出方法: Orton et al. [1991] (成層圏)、Orton et al. [1994](対流圏)と同じ
- Voyager 1 の電波掩蔽観測による鉛直温度分布をbaseline profileとしてリトリバーバル
- 温度導出に使用したスペクトルは既出、地球大気の吸収や限られたスペクトル分解能のため精度は劣る

Voyager電波掩蔽観測
[Lindal et al., 1981]

Fig.4:IRTF観測による
温度の緯度分布の変化



Discussion (高緯度)

Fig. 2: 温度(再掲)

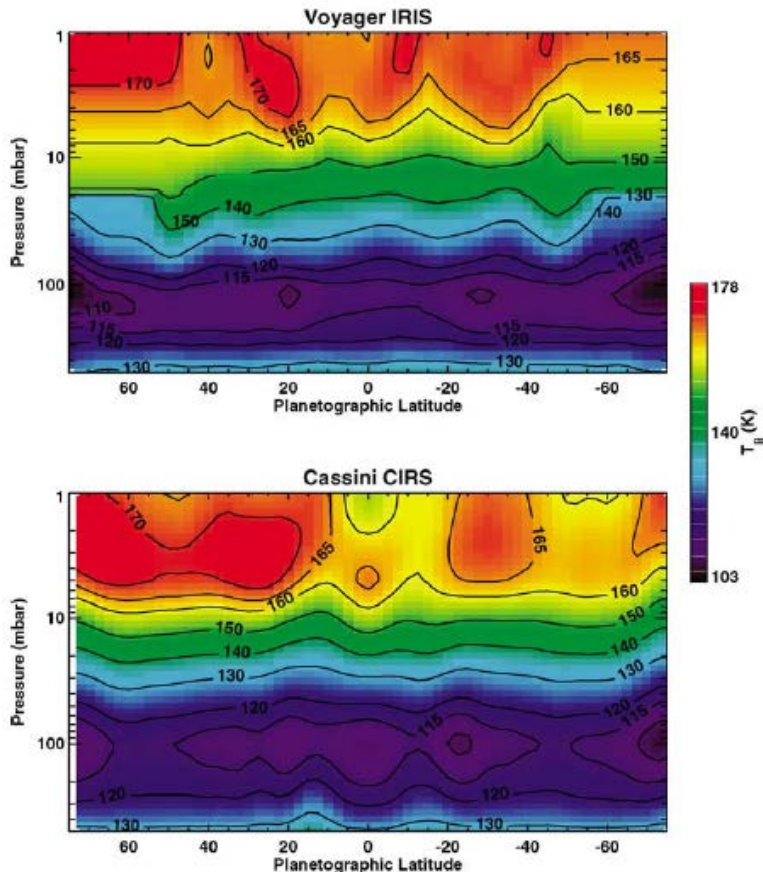
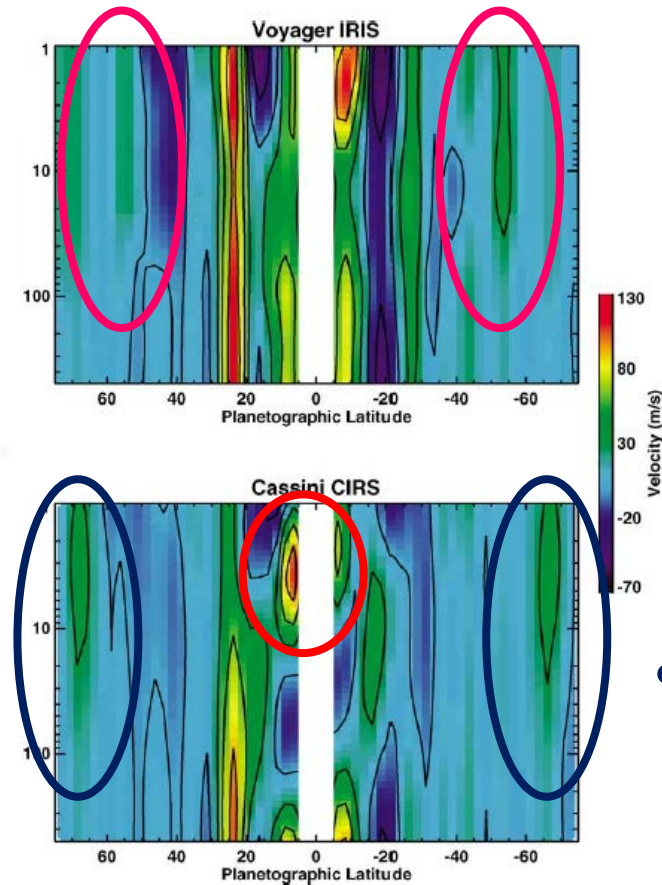


Fig. 3: 東西風速(再掲)



- 南北緯度55度付近に成層圏東西風ジェットが存在: ハッブル宇宙望遠鏡による'polar hood'(高緯度成層圏もや)の観測とも一致
- より高緯度(65度辺り)にもジェットがある

- CIRSやIRISで観測されたこのような「極渦」は、地球の極大気と同様、力学や組成に大きな影響を与える
- 4mb高度辺りに強い赤道成層圏ジェットが存在(準4年振動の影響?)

Discussion (低緯度)

Fig. 5: 全球平均鉛直1次元
温度と経度平均温度の差

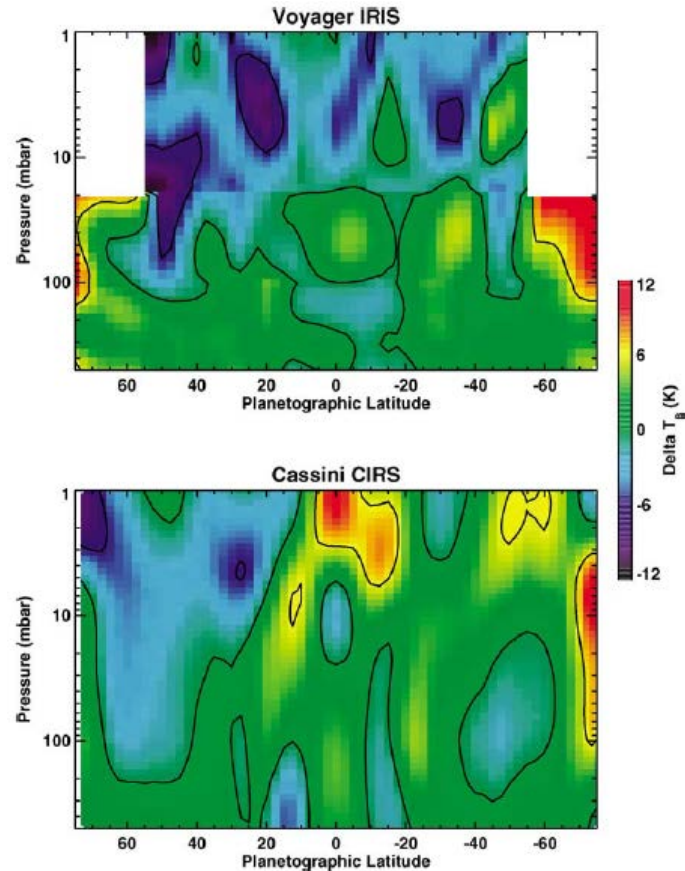
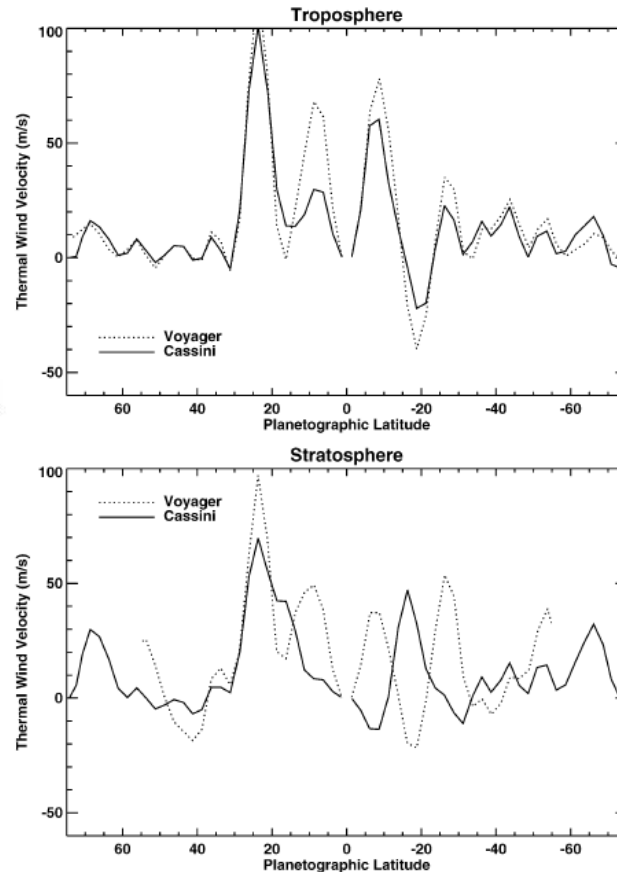


Fig. 6: 対流圏(250mb)と
成層圏(20mb)の風速



- 対流圏風速分布:
緯度20度以上においてはIRISとCIRSで大きな違いはないが、赤道域では大きく異なっている
- 成層圏の風分布の違いはより大きい
- IRISの観測では赤道の対流圏の温度は周りの緯度に比べて高いが、CIRSの観測では低くなっている

Discussion (低緯度)

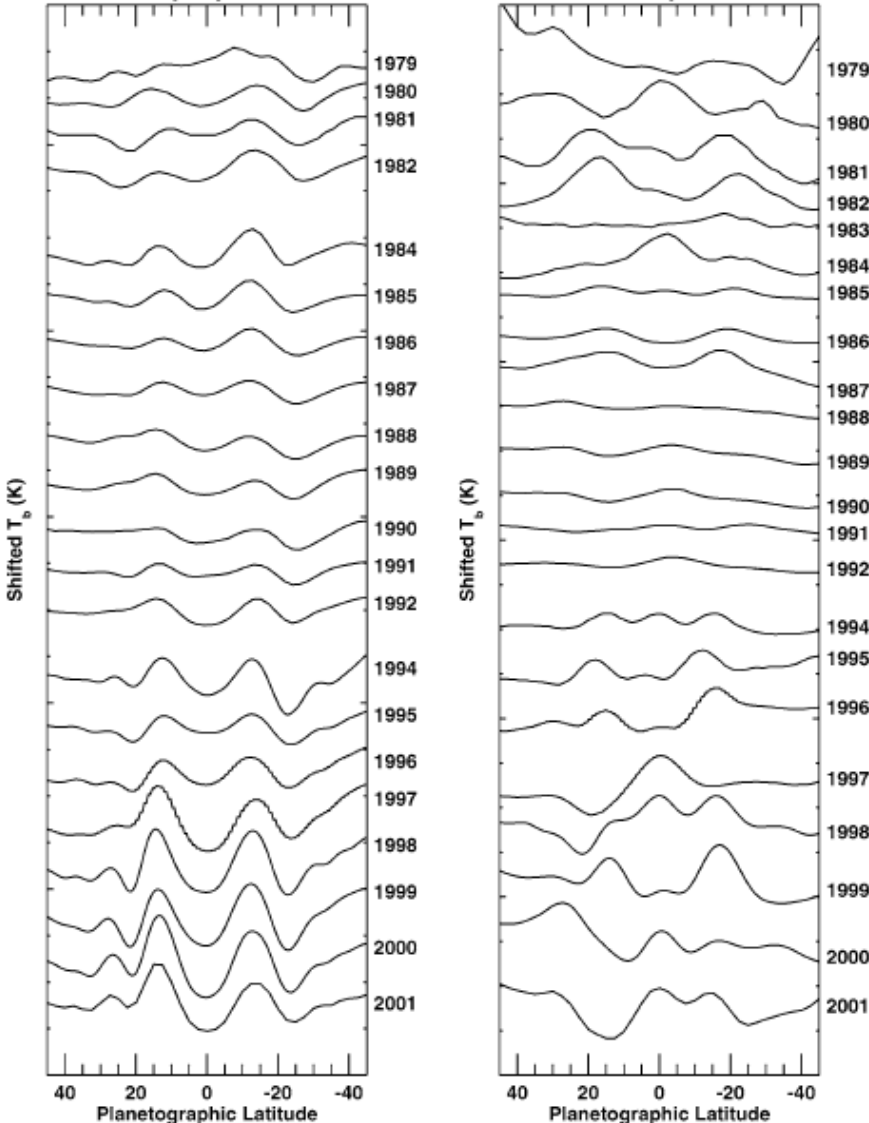
Fig.4(再掲)

250mb

20mb

Troposphere

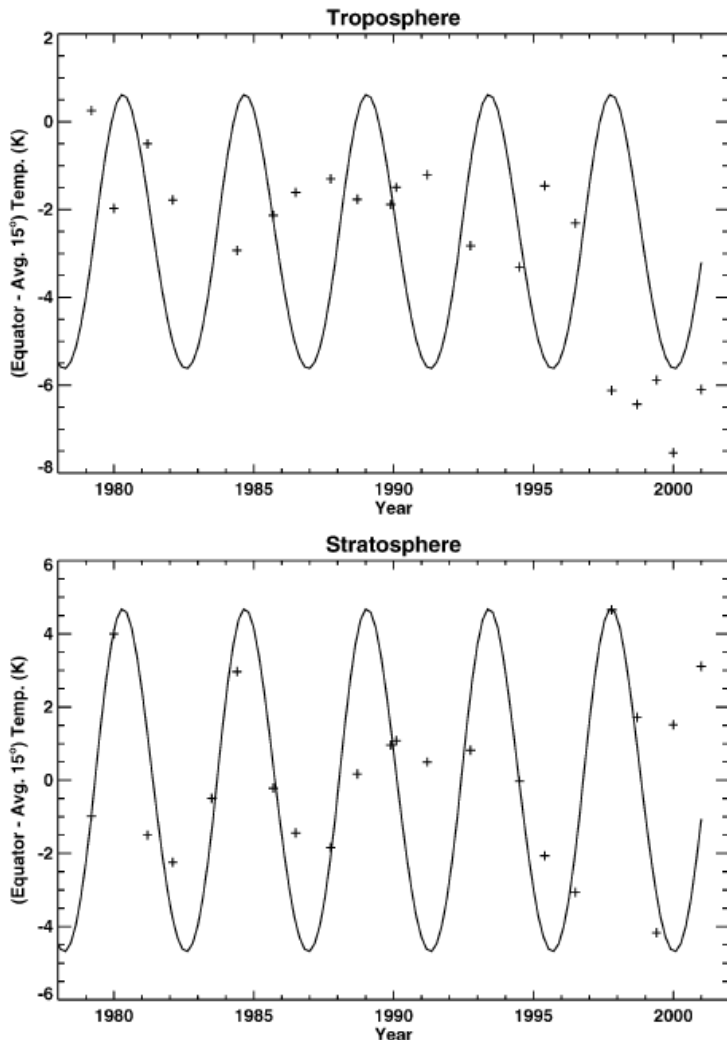
Stratosphere



- 赤道の対流圏温度は1979年(IRISの頃)は周りより高いが、1984年までの間は周りより下がる傾向
- 1984年以降はまた上がる傾向に(1991年頃まで)
- それ以降はまた下がる傾向、1995年以降はさらに緯度温度差が大きくなっている
- 成層圏の赤道域温度は対流圏よりも変動が激しく、準4年振動(QQO)に支配されている
- それはFig.5でIRISとCIRSで成層圏の緯度方向の温度構造が全然違うことから示唆される

Discussion (赤道振動)

Fig. 7: 赤道域温度の変化
(南北緯度15度以内の平均との差)
サインカーブは4年周期



- 対流圏・成層圏とも、その緯度温度分布の変化は様々な周期の要素が混ざっているように見える
- それでも成層圏はQQOの要素が強め(周期は3.5~4.3年)
- 1994~95年まではだんだんと振幅が弱まっているように見える
- 1994年にシューメーカー・レビー第9彗星の衝突があり、そこで南半球の成層圏に熱とエアロゾルが注入されて振動の様相が変化している
- 対流圏は周期的変動があまり目立たない、成層圏の大気変動が数年遅れて対流圏に伝わる？(1997年頃の大幅な変化)

Discussion (南北温度非対称性)

Fig. 8: 同じ緯度の南北温度差
(北半球－南半球)の変化
サインカーブは1木星年＝11.86年
周期(太陽直下緯度に対応)

木星の軌道傾斜角＝3°
離心率＝0.048

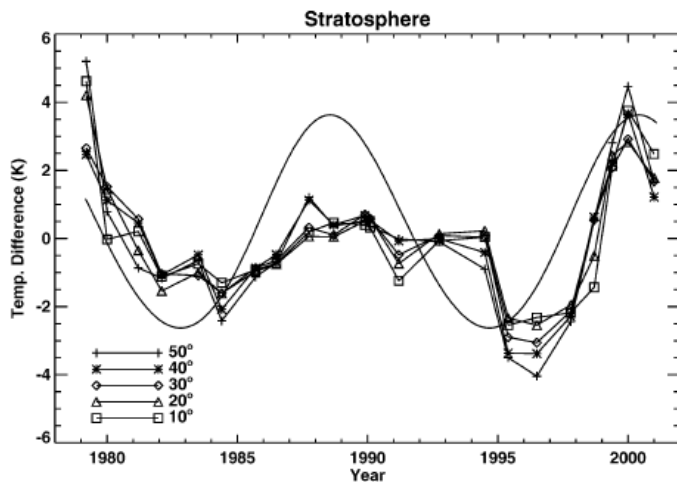
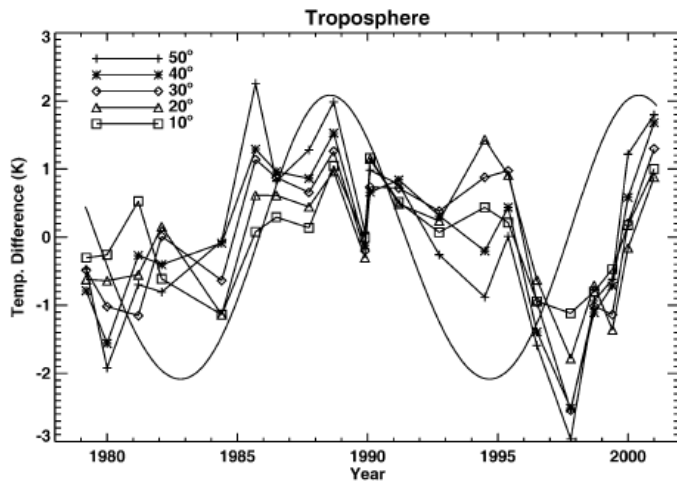
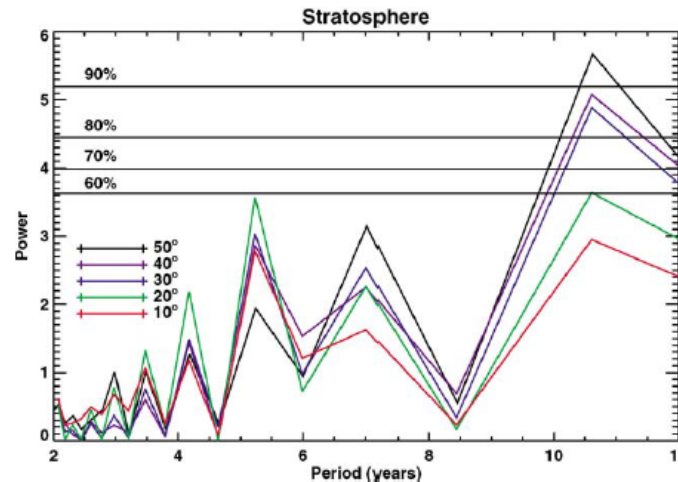
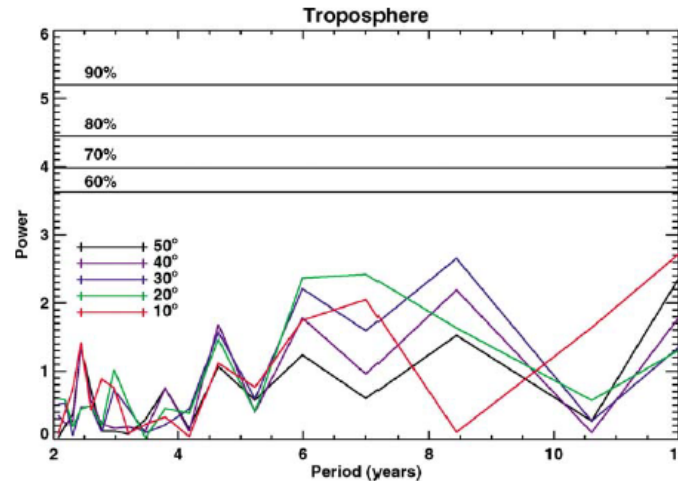


Fig. 9: 周期のスペクトル



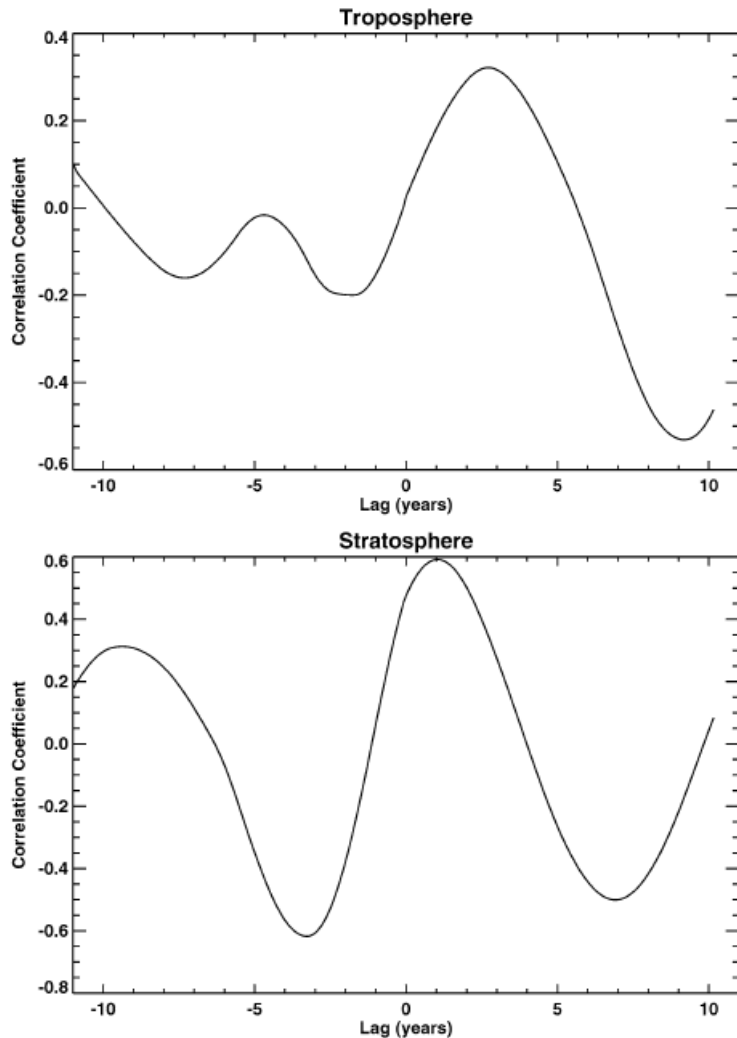
- 成層圏の中緯度の温度(南北非対称性)には1木星年周期の変動があるよう

- 赤道域や対流圏には顕著な周期変動は見られず

Discussion (南北温度非対称性)

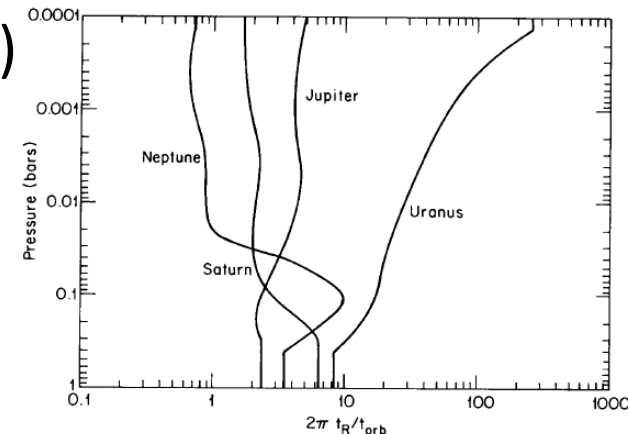
Fig. 10: 緯度40度の南北温度差
(40°N-40°S)と
太陽直下緯度との相関

木星の軌道傾斜角=3°
離心率=0.048



- 成層圏(20mb)の北半球温度が最も高くなるのは、北半球夏至の約1年後
- 同じく対流圏(250mb)では約2.5年後
- この時間差は放射緩和時間 τ_r が長いほど大きくなる、Conrath et al. [1990]の計算では成層圏(20mb)で $\tau_r \Omega_s \sim 4$ 、対流圏(250mb)で $\tau_r \Omega_s \sim 2$ (Ω_s は公転角速度)

→この論文では
矛盾が指摘された
が、Kuroda et al.
[2014]で解決(後述)



[Conrath et al., 1990]

Discussion (鉛直・南北流)

- 低緯度の空間構造や温度変化は地球のQBO(準2年振動)的なメカニズムに支配されているよう
- 1994年のシューメーカー・レビー第9彗星の衝突(南緯45度地域)でエアロゾルが成層圏に注入された、その影響で赤道域の温度も下がった？(Fig.7)

- しかし衝突後も温度の緯度分布は南北対称性を保っているよう(エアロゾル分布は明らかにそうではない) (Fig.4)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{N^2 H}{R} w = 0$$

- 鉛直流に伴う断熱加熱・冷却の議論:

- 成層圏の中緯度の温度差は3年で6Kくらい変化(Fig.4)

これは約0.002 cm s⁻¹の鉛直流の効果に相当

- 同、低緯度では2年で8K(鉛直流0.005 cm s⁻¹相当)

(A.3')
温度変化と
鉛直流

- これらの速度は、過去の大赤斑やベルト構造の観測から得られた見積もりと整合する

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_0 \frac{f_0^2}{N^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_0 \frac{f_0^2}{N^2} \frac{T_e - T}{\tau_r} \right) \text{放射}$$

鉛直流

$$+ \frac{H f_0}{R} \frac{\partial G}{\partial y} = 0.$$

南北流

(A.5'') G: mechanical forcing
緯度・鉛直温度場がわかればこの式から循環の効果は見積もれる

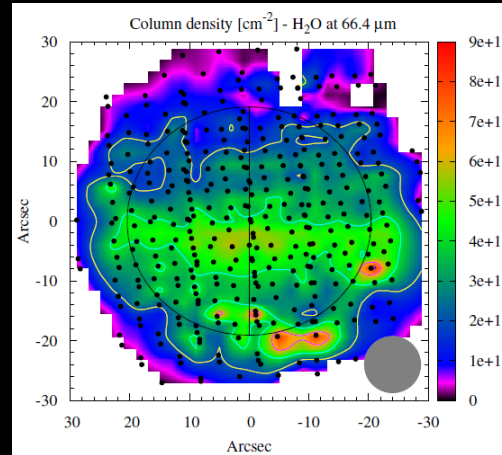
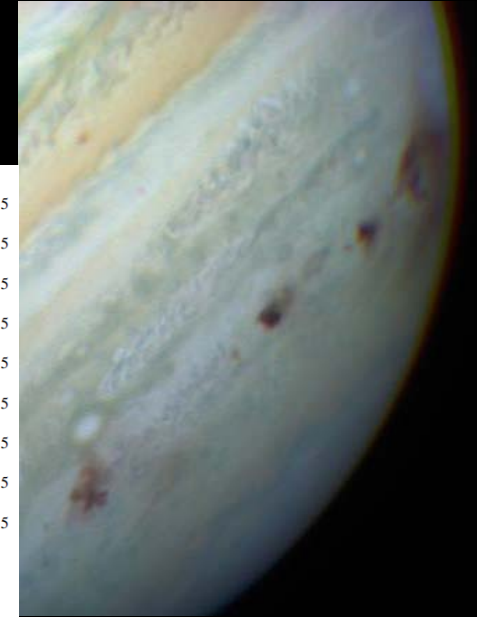
まとめ

- 上部対流圏と成層圏(雲層よりも上)は地球なみに力学過程に富んでいる
- 3次元温度場の観測から、子午面循環の様子や循環を促進する波動の様子が見て取れる
- しかし十分な空間分解能で温度とその鉛直変化を導出するのが難しい→高分散での地上観測か長期の周回船観測で改善できるか
- モデルによる放射効果の季節変化の検証:緩和時間の矛盾に関連して
- 子午面循環についての周期的・日周期的な過程の見分け:IRTFにより1995~2002年にGalileo観測のサポート目的で取得したデータを見れば、100~400mbについてはより詳しい知見の獲得が見込まれる(残念ながら成層圏については同様のデータはない)
- 対流圏の鉛直流を見るには雲、NH₃分子、PH₃分子をトレーサーとしてみるという手もある。1995~2002年に取得された地上望遠鏡やVoyager, Cassini, Galileoのデータにもその辺りの情報があるはず
- H₂分子のpara比もトレーサーに使える、実際大赤斑の周辺はpara比が周りより小さい、おそらく対流や鉛直方向の流れが活発なせいで[Simon-Miller et al., 2002]
- 成層圏には西向きの動きとかあるので、大気のスเปクトル解析からいろいろ見えてきそう[Flasar et al., 2004]

大気微量成分

SL9の衝突
[HST, 1994]

Herschel/PACS観測による水カラム量
[Cavalie et al., 2013]

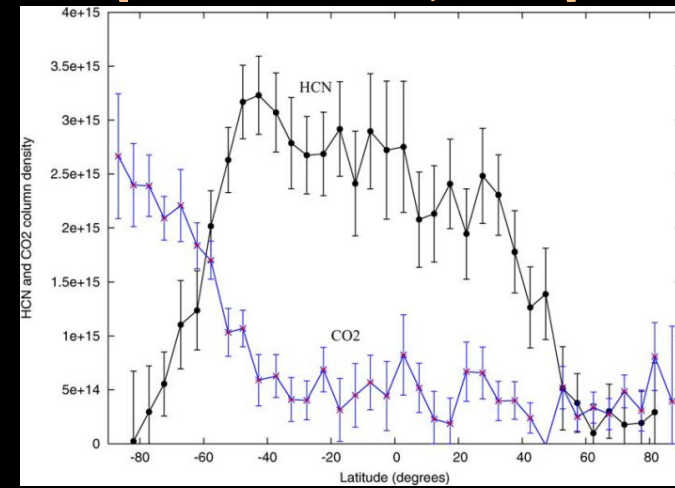


木星の大気組成は、1994年の Shoemaker-Levy 9 (SL9) 衝突にも見られるように、惑星外部からの影響を度々受けていると考えられる。SL9 衝突の際には、水、CSやCO, HCNといった分子が木星大気に注入されている。

CSやCOといった分子は、化学的に比較的安定な為、SL9衝突発生後、惑星全体に広がり希薄化していく様子がその後観測されており、木星大気における大気循環や渦拡散を定量的に測るトレーサーとなっている。(同位体・オルトパラ分布も同様)

近年のCassini探査機による観測では、空間分解能の良い観測が実現した結果、HCNとCO₂が木星上で異なる空間分布(HCNが極域では殆ど存在しないのに対し、CO₂は南極にその存在量の極大を持つ)が示されている。

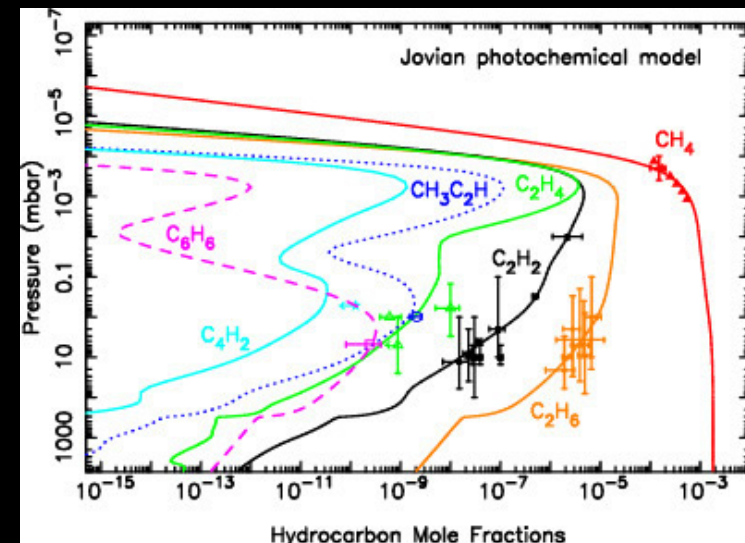
Cassini/CIRS観測による HCNとCO₂量の緯度分布
[Lellouch et al., 2006]



JUICE/SWIで何が測れるか？

- JUICE/SWIでは木星成層圏に存在する微量大気成分 (CH_4 , H_2O , HCN , CO , CS 等) からの大気放射をヘテロダイン技術を利用して非常に高い周波数分解能で観測する。
- 大気中分子の輸送を分子吸収線のドップラーシフトとして観測することが可能である。風速を観測出来る高度は、例えば木星大気中にほぼ均質に存在していると考えられる CH_4 を利用した場合、0.1 -10 mbar と広い高度領域をカバーすることが出来る。
- CH_4 の吸収線幅と強度から、気温の鉛直分布を推定することも可能。
- 物質循環を高い空間分解能(緯度分解能1度)で観測を行い、様々な空間・時間スケールの水平移流と拡散プロセスを定量的に明らかにする。
- H_2O の鉛直・緯度分布も重要な観測ターゲットで、巨大ガス惑星における H_2O の起源を定量的に評価する。
- 同位体比・オルトパラ比の観測から、大気物質の起源、ガス惑星の形成・進化に迫る。

光化学モデルによる
成層圏内の炭化水素の混合比



[Moses et al., 2005]

SWIの精度・ターゲット



	氷衛星 表層	氷衛星	木星
Physical paramet ers	Brightne ss temp.	3-D profiles of temperature, winds, and atmospheric compositions	
		H ₂ O, 17-O, 18-O, D, O/P, O ₂ , 13-C, NH ₃ , CH ₃ OH, H ₂ CO, CS, C ₃ S, T, P	SL-9 impact: CS, HCN, CO, H ₂ O, O ₂ , T, P, CH ₃ OH, H ₂ CO, HC ₃ N, CH ₃ CCH HCl, 17/18-O, D/H, 13-C, 15-N, 34/33/32-S
Vertical res.		1 km (@500km)	~ scale height (1000-2000km@15Rj)
Spatial res.	10- 30km	2 – 10 km	< 5 degrees,
Dopp. winds		10 m/s	10 m/s
Obs. Freq.	600 GHz (~530 – 600 GHz), 1.2 THz (~1.075 – 1.275 THz)		
Freq. res.	ACS: 19.5 – 4.9 MHz (256-1024 ch), CTS: 0.1 MHz (10000 ch)		
Tsys	1500 K (DSB, 600 GHz), 3000 K (DSB, 1.2 THz)		
Antenna	Size: 30cm, Surface accuracy: < 6 μm r.m.s		

木星成層圏GCMの開発

放射コードの開発

[Kuroda et al., 2014, Icarus 242, 149-157]

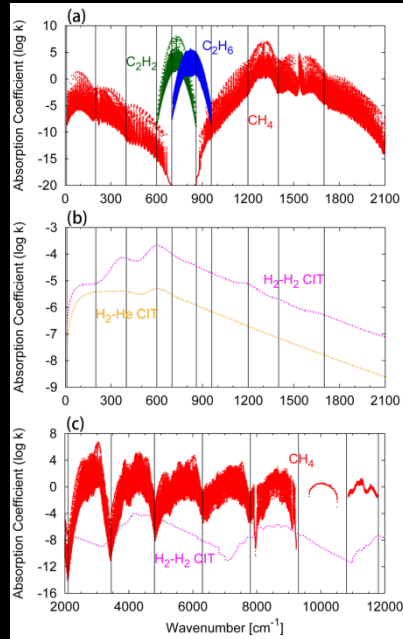
CH₄: 太陽光吸収

CH₄, C₂H₂, C₂H₆,

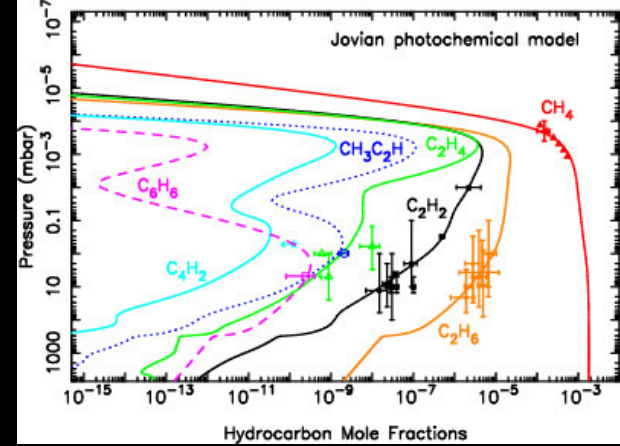
H₂-H₂とH₂-Heの

衝突誘起吸収:

赤外冷却に寄与



放射計算に用いた
吸収線スペクトル



[Moses et al., 2005]

バンドモデルの詳細

Band	IR(infrared)/ SO(solar)	Wavenumber range [cm ⁻¹]	Molecules
1	IR	10-200	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
2	IR	200-400	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
3	IR	400-600	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
4	IR	600-700	CH ₄ , C ₂ H ₂ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
5	IR	700-860	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
6	IR	860-960	CH ₄ , C ₂ H ₆ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
7	IR, SO	960-1200	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
8	IR, SO	1200-1400	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
9	IR, SO	1400-1700	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
10	IR, SO	1700-2100	CH ₄ , H ₂ -H ₂ , H ₂ -He
11	SO	2100-3450	CH ₄ , H ₂ -H ₂
12	SO	3450-4800	CH ₄ , H ₂ -H ₂
13	SO	4800-6300	CH ₄ , H ₂ -H ₂
14	SO	6300-7800	CH ₄ , H ₂ -H ₂
15	SO	7800-9200	CH ₄ , H ₂ -H ₂
16	SO	9300-10800	CH ₄ , H ₂ -H ₂
17	SO	10800-11800	CH ₄ , H ₂ -H ₂

- 相関k-分布法

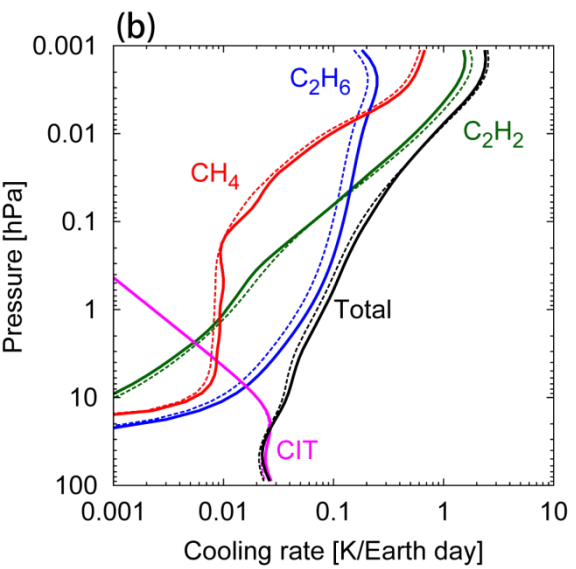
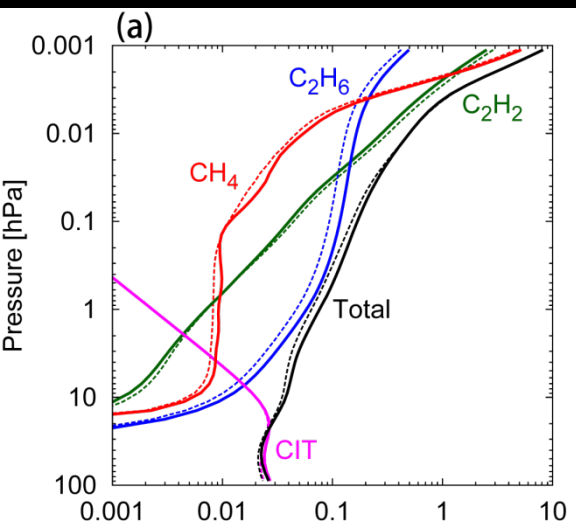
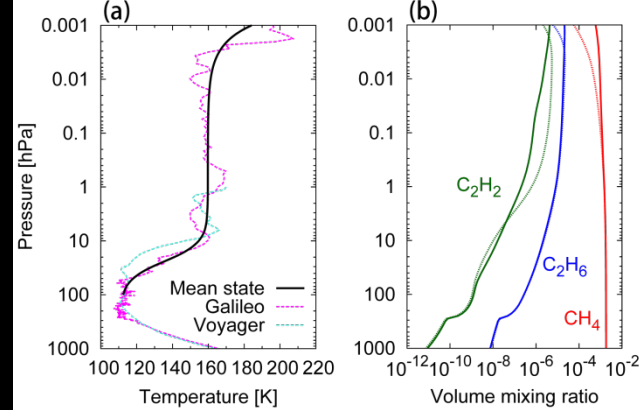
- 10⁻³~10³ hPaの
範囲で13点の気圧グリッド
(log等分)、3点の温度グリッド
(100, 150, 200 K)

- 成層圏エアロゾルの効果は
未導入

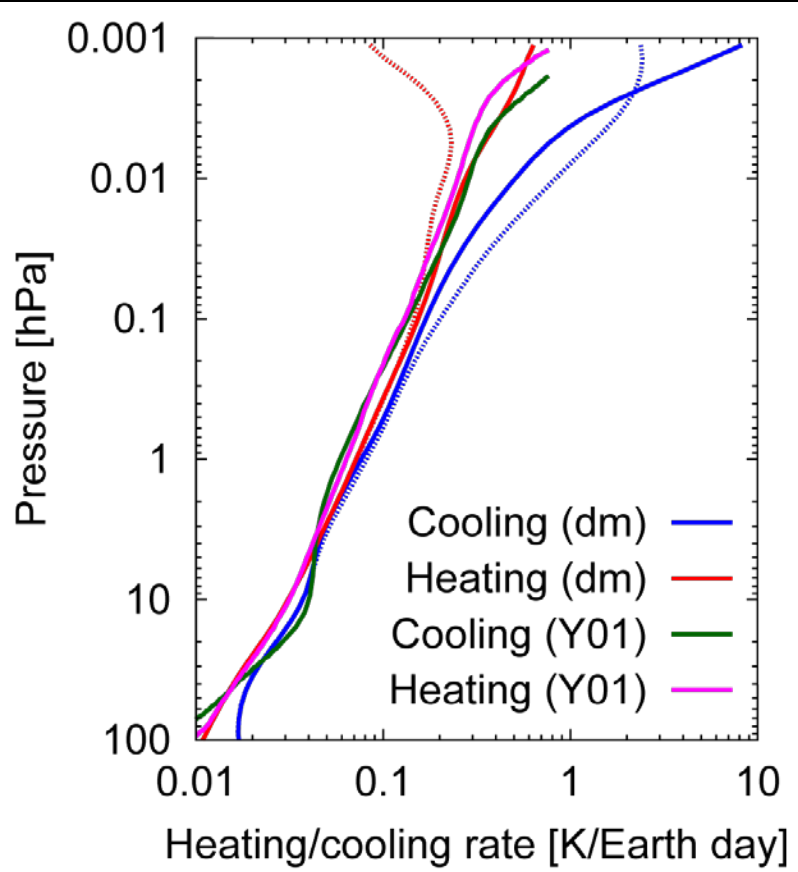
放射コード: 鉛直1次元計算の結果

分子ごとの赤外冷却効果:
LBL計算(点線)との比較

温度と組成の
インプット
パラメータ



放射平衡: 先行研究
[Yelle et al., 2001]との比較



- LBL計算と非常に整合的 (誤差10%以内)
- 木星成層圏は放射平衡が成り立つ (上層でcoolingが強いのはnon-LTE効果が考慮されていないため?)

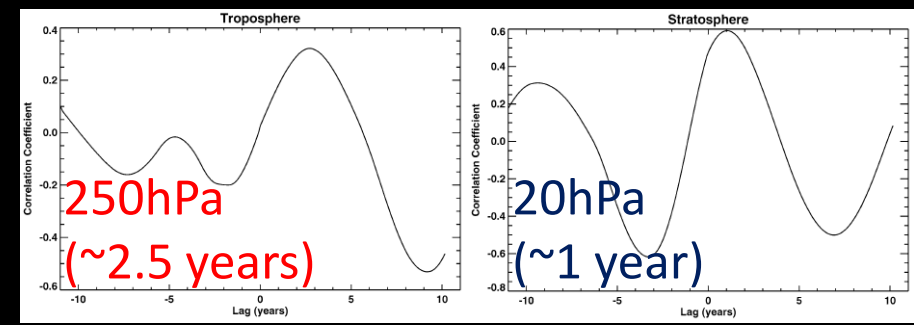
放射緩和時間の議論

$$\tau = -\frac{\Delta T}{\Delta Q}$$

放射緩和時間
(温度差 ÷ 冷却率の差)

放射緩和時間の鉛直分布:
Conrath et al. [1990]との比較

Simon-Miller et al. [2006]より



Conrath et al. [1990]における冷却率の式

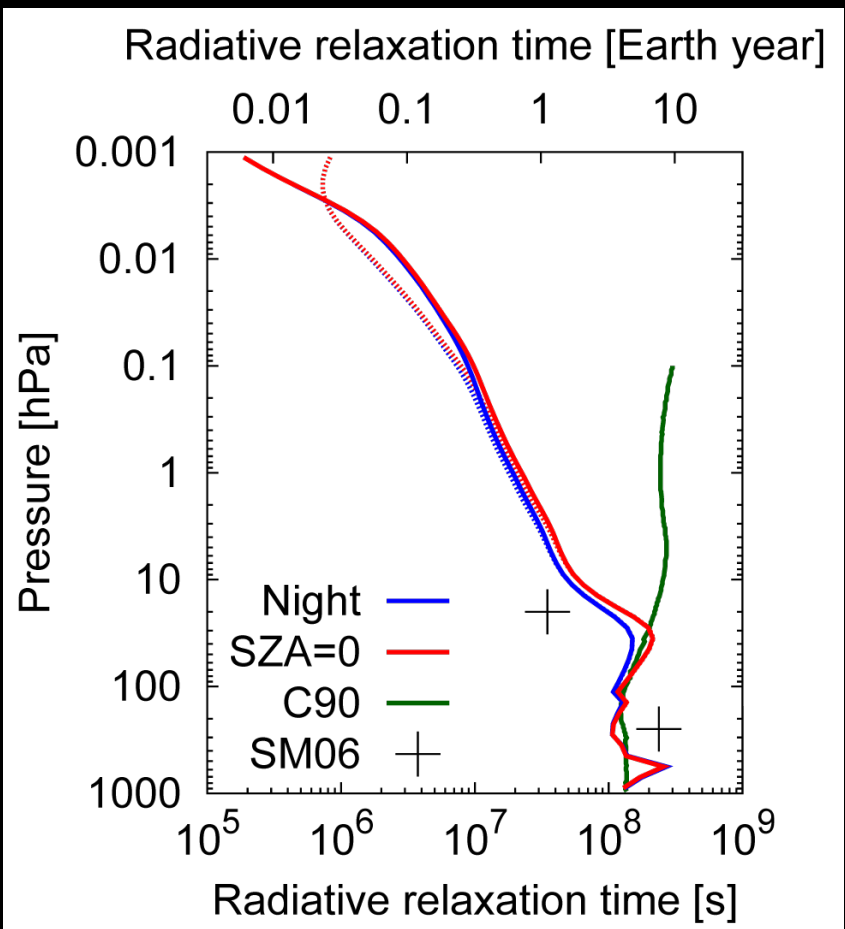
$$Q_s = \rho g \mu_0 \sum_{i=1}^3 \frac{d \ln(\hat{p}_i N_i)}{dp} F_{\odot i} A_i$$

$$\times \left[1 + \left(\frac{A_i d_i \mu_0}{2 S_i \gamma_i \hat{p}_i N_i} \right)^{1/2} \right]^{-1} + \rho g \frac{dN_i}{dp}$$

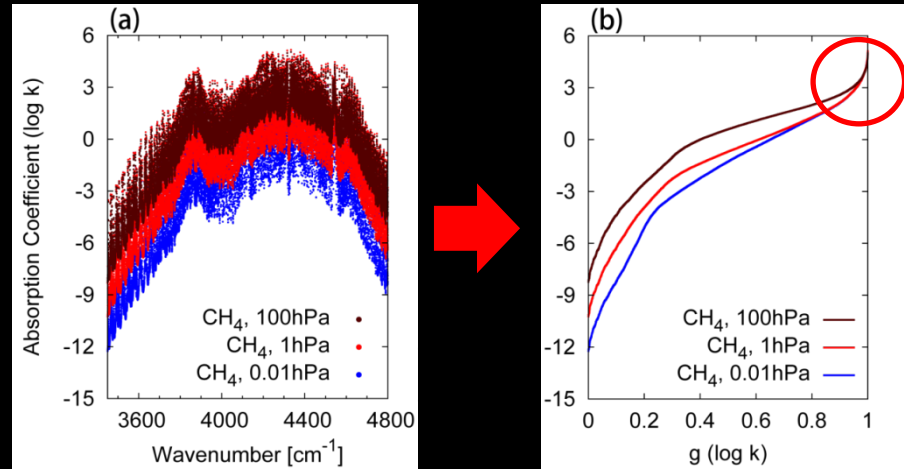
$$\times (\bar{F}_{\odot a} \Delta \nu_a C_a e^{-C_a N_i / \mu_0} + (\bar{F}_{\odot b} \Delta \nu_b C_b e^{-C_b N_i / \mu_0}))$$

←密度(~気圧)に比例

↓吸収線ピークでは気圧によらず一定



k-分布



GCMとRossby radius

木星GCMは高分解能が必要、なのでお手軽ではない

Rossby radius of deformation

$$L_D = NH/f \propto T/gf,$$

惑星間比較 [Showman et al., 2010; Sethunadh, 2014]

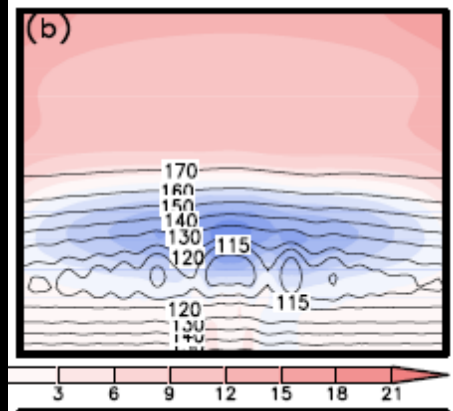
Planet	a (10 ³ km)	Ω (rad s ⁻¹)	gravity(ms ⁻²)	T_{eff} (K)	H(km)	U_c (ms ⁻¹)	L_D/a	L_β/a
Venus	6.05	3×10^{-7}	8.9	232	5	20	70	7
Earth	6.37	7.27×10^{-5}	9.82	255	7	20	0.3	0.5
Mars	3.396	7.1×10^{-5}	3.7	210	11	20	0.6	0.6
Titan	2.575	4.5×10^{-6}	1.4	85	18	20	10	3
Jupiter	71.492	1.7×10^{-4}	24.79	124	27	40	0.03	0.1
Saturn	60.268	1.65×10^{-4}	10.44	95	60	150	0.03	0.3
Uranus	25.56	9.7×10^{-5}	8.7	59	25	100	0.1	0.4
Neptune	24.76	1.09×10^{-4}	11.1	59	20	200	0.1	0.6

- Rossby radius of deformation: 浮力による慣性的な動きがどれだけ水平方向に広がるかの指標。低温、高速回転、あるいは重力加速度が大きいと小さくなる
- Wave-mean flow interactions を適切にシミュレーションするには、GCMはRossby radius of deformationより短いスケールの動きを分解する必要がある

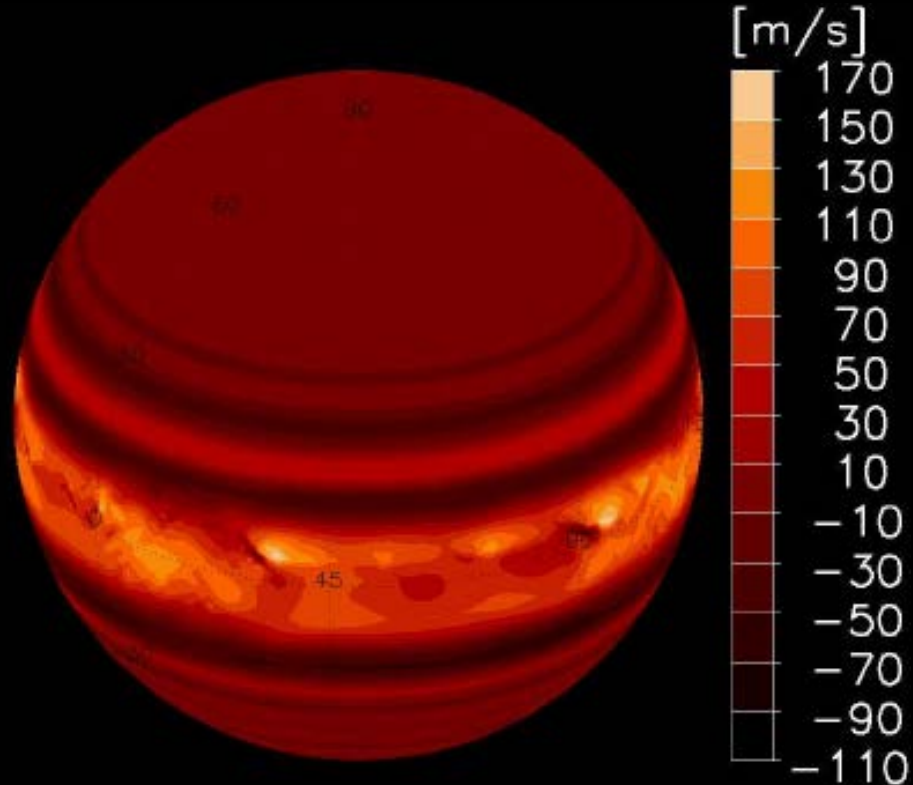
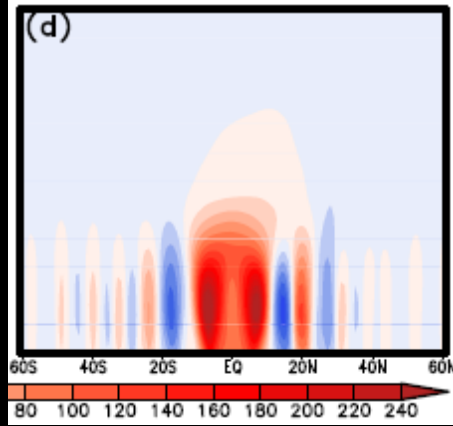
Max-Planckで開発中の木星成層圏GCM

- Log-pressure鉛直41層、0.01-1000 hPa (対流圏の雲頂から成層圏上層まで)
- 水平分解能: 240(経度) × 180(緯度) grid points (1.5°×1°)
- 放射はニュートン冷却、緩和時間の鉛直分布は Kuroda et al. [2014]の結果を使用

温度



東西風速



今後の予定:
Kuroda et al. [2014]の
放射コードの導入
土星・系外惑星などへの
適用など

30hPa高度の風速分布
(風速の下端境界条件はCassini/VIMSの雲トラッキングより)

サブミリ波観測と惑星科学

深宇宙の探査

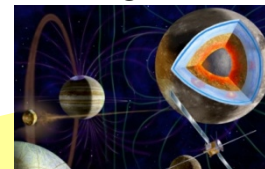
Planetary Science

Deep space/Light

2004

ROSETTA/MIRO

2022



JUICE/
SWI

太陽系探査
生命探査

惑星系形成
系外惑星

Heterodyne receivers
Spectrometers

Antenna and Optics

1992



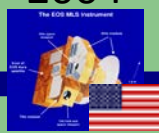
MLS

2002



SMR

2004



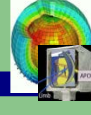
MLS

2009



SMILES

2018: APOLLO
Environment



1982



NRO

1998



SWAS



ASTE

NANTEN
Submillimeter Observatory
NANTEN



Herschel/HIFI

2012



ALMA

Satellites
Balloons
Antarctica

新規周波数の開拓

(MW→MMW→Sub-mm→THz)

Earth
Astronomy

Science

SWIのサイエンス:まとめ

- JUICE-SWI: 木星系のキャラクタリゼーションとハビタビリティの理解に重要なデータを提供

カリスト氷物質：化学同位体組成 ⇔
円盤から衛星までシームレスな研究体制とモデル化

エウロパ表面/プリューム組成 ⇔
元素分配、素過程実験内部海物質モデル

木星成層圏のダイナミクスと化学 ⇔ GCM + 光化学

- 天文学、惑星科学、地球化学、極限生物学の学融合の場の一つとしての木星探査

木星大気観測に関するまとめ

- 比較惑星気象学の見地からも木星成層圏大気は面白い
特に風速場、位相速度の遅い波動
(ドップラーで直接観測して風速場マッピングできれば画期的) (対流圏との関連は? :Junoとのコラボレーション)
- QQOに代表される東西風の駆動メカニズム
- 場の風速と全然異なる波の位相速度の起源は?
- プラズマ観測(RPWI)とのシナジー(北極のhot spotなど)
- 大気放射バランス
- 光化学、起源と進化
- GCM開発とそれを用いた準備的研究