

卒業論文

DCPAM 5 を用いた木星赤道域に
おける $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットの
数値シミュレーション

平成26年1月30日

北海道大学 理学部 地球科学科
宇宙惑星グループ 渡部研究室 4年

指導教員：渡部 重十

学籍番号 22100013

川原 健史

要旨

木星の 8°N 付近には、 $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットと呼ばれる、可視光で見た際に暗く見える領域が存在しており、この領域は $5\ \mu\text{m}$ の熱放射が他の領域よりもより強いことが観測されている。この領域はその個数と速度の関係、またその並びのパターンから木星赤道領域の赤道波、特にロスビー波との関係が先行研究によって示唆されている。また、数値計算によって、ホットスポットのパターンを模した高気圧帯が木星上に存在した場合、その構造は維持されることが確認されている。しかしながら、ホットスポットがロスビー波の動きと矛盾しないことと、ホットスポットを維持する機構に関しては研究が進んでいるが、ホットスポットの生成要因であると見積もられる波の生成要因については明らかになっていない。

本研究では、ホットスポットの生成要因と見積もられる波、特に赤道ロスビー波の生成要因を解明するために、地球流体電脳倶楽部の開発した DCPAM 5 (Denno-Club Planetary Atmospheric Model 5) と呼ばれる大気モデルを用い、木星に大赤斑を模した風速の擾乱を与えた際の全球の対流シミュレーションを行い、擾乱の有無に対する大気の応答を求めた。擾乱の有無による計算結果を比較し、またその風速の時間変化を追った結果、大赤斑の擾乱によって 8°N 付近にホットスポットに似た波が発生することがわかった。さらに、擾乱に対する応答の緯度ごとの違いに着目することで、 8°N 付近では周囲の緯度よりもより強くこの波構造が見られることがわかった。

しかしながら、時間が進むにつれて、大赤斑として与えた擾乱が弱まってしまう (実際の木星では非常に安定した構造である)、初期場として与えた木星の風速が維持できない等の問題も発生し、また今回見られた波構造についても、実際のホットスポット周辺に見られる波構造に比べると非常に弱く、今回の実験のみではホットスポットの成因を確定させるには至っていない。

目次

1	序論	4
1.1	木星大気の概要	4
1.2	5 μm ホットスポット	4
1.2.1	ホットスポットの特徴	4
1.2.2	ホットスポットと木星赤道ロスビー波の関連性	7
1.2.3	ホットスポットの周辺構造の観測	9
1.2.4	ホットスポットの安定性に関する数値シミュレーション	11
1.3	研究目的	12
2	DCPAM 5 による放射対流計算	13
2.1	DCPAM 5 の概要	13
2.2	支配方程式	13
2.2.1	物理過程-放射過程	16
2.2.2	物理過程-鉛直乱流過程	17
3	シミュレーション	18
3.1	GRS	18
3.2	計算設定	19
4	5 μm ホットスポットの成因	21
4.1	GRS を模した擾乱の有無に対する計算結果の比較	22
4.2	擾乱に対する応答の緯度ごとの比較	24

4.2.1	北半球での緯度による違い	24
4.2.2	北半球と南半球での違い	25
4.3	計算結果に対する考察	25
5	まとめ及び今後の展望	27
5.1	本研究のまとめ	27
5.2	5 μm ホットスポットの数値シミュレーションに関する今後の展望	27
6	謝辞	28
7	参考文献	29

1 序論

始めに、木星の大気の特徴と構造について 1.1 節で記述する。次に、1.2 節で本研究のターゲットである木星の赤道域における $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットとその先行研究について述べ、最後に本研究の目的を 1.3 節で述べる。

1.1 木星大気の概要

木星は、太陽系の中で最大の惑星であり、惑星半径は地球の約 11 倍、1 bar 高度での重力加速度は $23.1\ \text{m/s}^2$ 、大気の主成分は H_2 (86.4 %), 次いで He (13.6 %) であり、その他に微量元素として CH_4 (0.2 %) と NH_3 (0.007 %) が存在している。

木星の温度構造は探査機 Pioneer や Voyager による軌道上からの観測, Galileo のエントリープローブによる直接観測によって得られており、対流圏界面の気圧は 0.1 bar, 温度は 110 K 程度である。これらの情報から、木星対流圏の雲構造は大気圧に対して上から順に NH_3 (0.72 bar), NH_4SH (2.61 bar), H_2O (5.69 bar) の雲層が存在しており [Atreya et al., 1997], その更に上層にはヘイズと呼ばれる何らかの物質のエアロゾルからなる薄いもやが存在していることがわかっている。この雲は全球のほとんどを覆っているが、雲が無い (もしくは少ない) と考えられているエリアもいくつか観測されており、その中でも 8°N 付近に点在しているものは、 $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットという名前で知られている ($5\ \mu\text{m}$ ホットスポットについては 1.2 節で詳しく述べる)。

表 1.1 には、本研究で用いた木星の物理特性をまとめている。木星はガス惑星であり厳密に地表面を定義することはできないため、惑星半径は一般的に広く利用されている 1 bar 高度のものを用いている。また、自転速度に関しては System III (木星磁場の自転) のものを用いている。

1.2 $5\ \mu\text{m}$ ホットスポット

1.2.1 ホットスポットの特徴

$5\ \mu\text{m}$ ホットスポットとは、木星の 8°N 付近に点在する $5\ \mu\text{m}$ の波長で観測した際に明るく見える領域のことを指す。この $5\ \mu\text{m}$ の放射は 8 bar 高度付近の気体による 255 K の熱放射によるものであり、その上層の雲、主に NH_3 雲が下降気流によって取り払われていることにより、下層の温度放射が宇宙空間へと直接射出されていると考えられている。事実、木星を可視光 (600 - 950 nm) の波長範囲で観測した際には、このホットスポットの領域は周囲よりアルベドが低く、暗い領域として観測されている (このことから、この領域は Dark Projection と呼ばれることもある)。可視光で観測した木星を図 1.1 に示している。

表 1.1: 木星の物理特性 (本研究で用いたものに限る)

惑星半径 (m)	自転角速度 (rad/s)	重力加速度 (m/s^2)
7.5×10^7	1.75×10^{-4}	23.1
平均分子量 (kg/mol)	定圧比熱 ($\text{J/K}\cdot\text{kg}$)	気体定数 ($\text{J/K}\cdot\text{kg}$)
2.3053533×10^{-3} * ¹	11900.9204 * ¹	3611.44466 * ¹
3 bar 面での光学的深さ (太陽放射)	3 bar 面での光学的深さ (熱放射)	太陽定数 (W/m^2)
3.0 * ²	80.0 * ²	50.7 * ²

*¹ Sugiyama et al. (2009) *² Schneider and Liu (2009)



図 1.1: ハッブル宇宙望遠鏡による 2007/5/11 の木星の画像 (NASA). 丸で囲った領域内に見える暗い領域がホットスポットである.

大きさは、緯度方向に 3000 km とある程度一定だが、経度方向には 5000 - 10000 km と様々である。また、その寿命や数も、それぞれ数週間から数年、8 - 15 個と様々であり、さらには一つもホットスポットが存在しない時期も存在する。その全体の個数の変動の周期は未だ解明されておらず、発生・合体・分裂・消失等のホットスポット個々の変動の周期やその原因についてもいまだよくわかっていない。

図 1.2 は、2000 年の Cassini の観測によるホットスポットの $7^{\circ}N$ 上の分布を観測日ごとに示したものである。この図から、個々のホットスポットの成長と衰退が一樣ではなく、それぞれに発生と消失、合体や分裂を繰り返していることがわかる。

Galileo のエントリープローブはこのホットスポットに落下したと考えられており、このことから Galileo によって得られたデータは木星大気一般に当てはまるものではなく、このホットスポットという特殊な環境の中でのみ成り立つ風速や温度構造であったのではないかと考えられている。

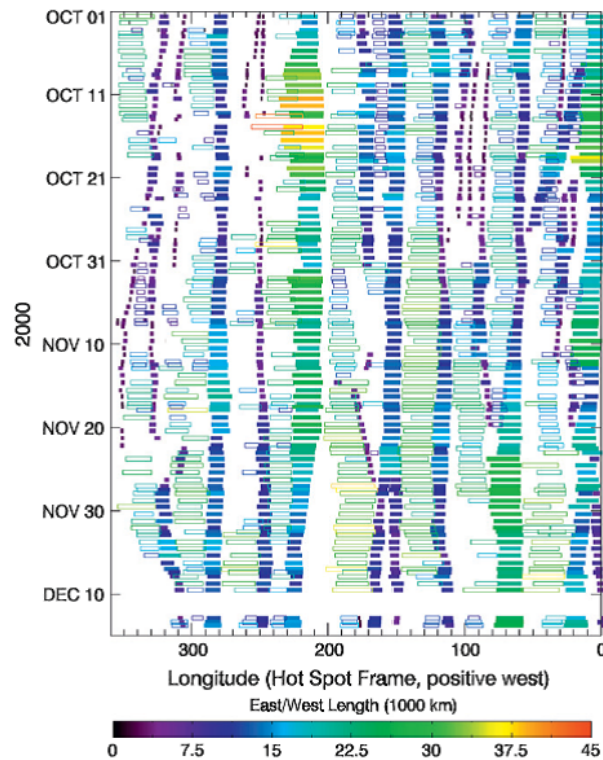


図 1.2: 2000/10/1 - 12/15 の期間における木星のホットスポットとプリュームの図 [D. S. Choi et al., 2013]. プリュームに関しては 1.2.3 節で解説している。中まで色を塗られているのがホットスポット、白抜きがプリュームを表している。色はそれぞれの領域の大きさを表しており、紫から赤に近づくにつれてその大きさが大きくなっている。

1.2.2 ホットスポットと木星赤道ロスビー波の関連性

このホットスポットは、その数と速度の関係から、ロスビー波との関連性が示唆されている。ロスビー波とは、回転球面上において特有の、ベータ効果による力を復元力とする波の総称である。この波は、背景風に対して西に伝搬していくことが知られている。木星赤道面上における System III に対するロスビー波の伝搬速度は以下のように与えられている [M. Allison, 1990].

$$c = u - \frac{\frac{\beta R_P^2}{n^2}}{1 + (2j + 1) \frac{\beta R_P^2}{n^2 \sqrt{gh}}}$$

ここで、 c はロスビー波の東進速度、 u は背景風の東進速度、 β は惑星渦度の緯度方向に対する傾き、 R_P は木星の赤道半径、 g は重力加速度、 h は風の流れが一様とみなせる領域の鉛直方向の厚さ (浅水流の厚さという)、 n は経度方向のロスビー波の波数、 j は経度方向の構造を示す指数 (緯度方向の波数に対応する) である。

これを観測事実と比較する。ホットスポットの速度は、観測より System III に対して $v = 96.6 + 0.45n + 0.02n^2$ であると見積もられているが、ここから背景風の速度を求め

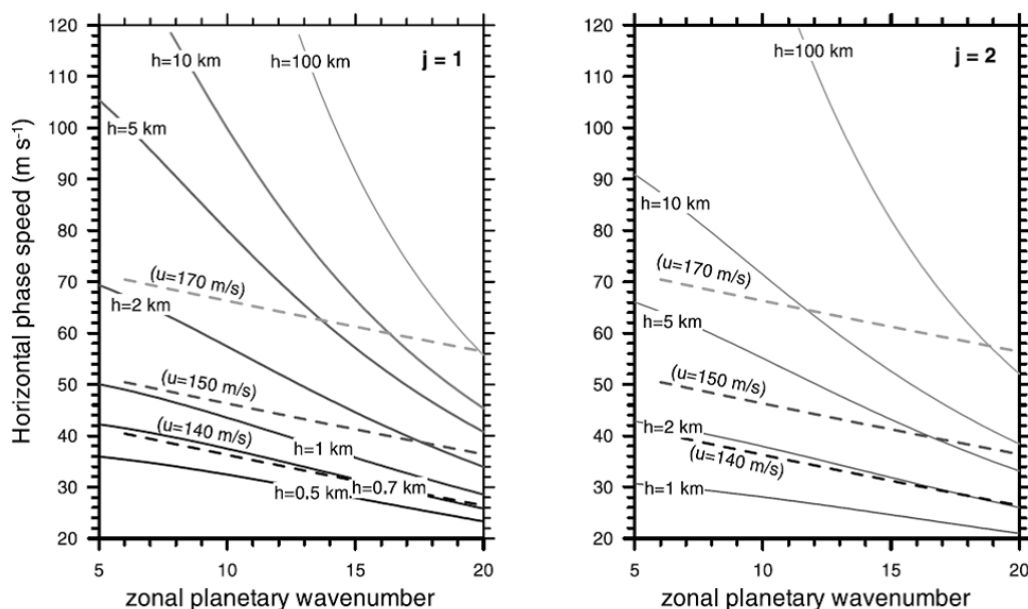


図 1.3: NEB 南端の風速と比較した際の背景風に対するロスビー波の波数と位相速度の関係 (実線) および dark projection の分布から与えられる波数と速度の関係 (破線) を表したグラフ [Arregi et al., 2006]. 西向きを正としている。背景風の風速は図中に示してある。

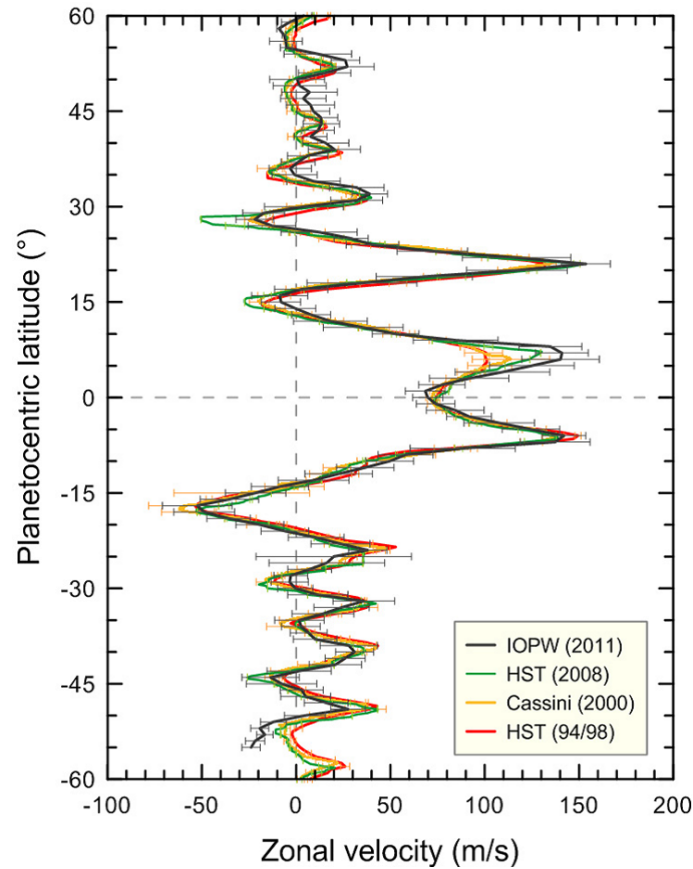


図 1.4: 1994 - 2011 の緯度ごとの帯状風の風速を示した図 [N. Barrado-Izaguirre et al., 2013]. 8°N 付近において, 50 m/s ほどの風速の変化が見て取れる.

ると, $u = 140\text{ m/s}$ 付近でロスビー波の速度の計算結果とよく一致する [J. Arregi et al., 2006]. 図 1.3 にロスビー波の波数と速度の関係, 及びホットスポットの波数と速度の関係を示してある.

この緯度帯での背景風は Cassini や Voyager, Hubble Space Telescope (HST) や地上からの観測で求められている [Barrado-Izazzire et al., 2013]. 求められたプロファイルを図 1.4 に示す. この結果によると, 7°N 付近には東向き風のピークが存在し, その風速は $100 - 150\text{ m/s}$ と大きく変化している. この風速の変化はホットスポットの有無と関連していると言われており, 風速が小さかった 1994 - 2000 年はホットスポットが 7°N 付近に存在しており, 逆に風速の速い 2008 年, 2011 年にはホットスポットが存在していなかった. この風速の変化は, ホットスポットの存在によってその緯度帯の風速が過小評価されたためであると考えられており [D. S. Choi et al., 2013], 本来のこの緯度帯の風速は, 2011 年に観測された 150 m/s であると考えられている. このことから, 観測で求められた背景風の速度と計算より求められた風速はよく一致しており, ホットスポットとロスビー波の間に何らかの関連性があるのではないかと考えられている.

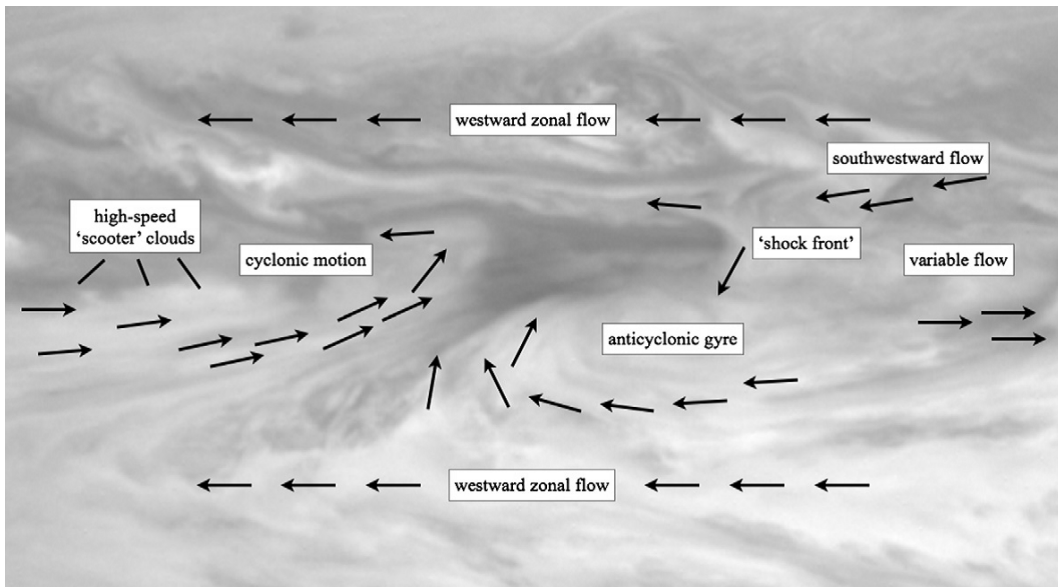


図 1.5: ホットスポット周りのローカルな風の動きを表した図 [D. S. Choi et al., 2013]. 矢印の大きさと風速は対応していない. ホットスポットの南東に反時計回りの渦, 西側に動きの早い雲の流れ (scooter clouds) があることが分かる.

1.2.3 ホットスポットの周辺構造の観測

ホットスポットのローカルな構造は, Cassini のスイングバイ時にクラウドトラッキングを用いて観測されている [D. S. Choi et al., 2013]. 観測によるホットスポットの動きで規格化した風の動きを図 1.5 に示す. 図に描かれていないその他の全てのホットスポットに共通の特徴として, 全てのホットスポット同士の間には雲の濃い部分 (プリューム) が存在しているということが挙げられる.

ホットスポット周辺の特徴的な構造としては, ホットスポットの南東に見られる時計回りの渦と, 西側に見られる非常に速度の大きい雲の流れが挙げられる. この時計回りの渦は数値シミュレーションによっても確認されており, これについては次節で述べる. 西側に見られる雲の流れは, System III に対して 150 m/s 以上の速度であり, プリュームの雲の最上部と同じくらいの高さに存在している. これは前節で述べた本来のこの緯度帯の風速が 150 m/s であるという仮説を裏付ける結果となっている. また, プリュームの存在は, その領域に雲を発生させる上昇気流が存在していることを示唆しており, それが経度方向にホットスポットと交互に並んで存在していることから, このホットスポット-プリュームの構造が惑星波によるものである, という仮説の根拠の一つともなっている.

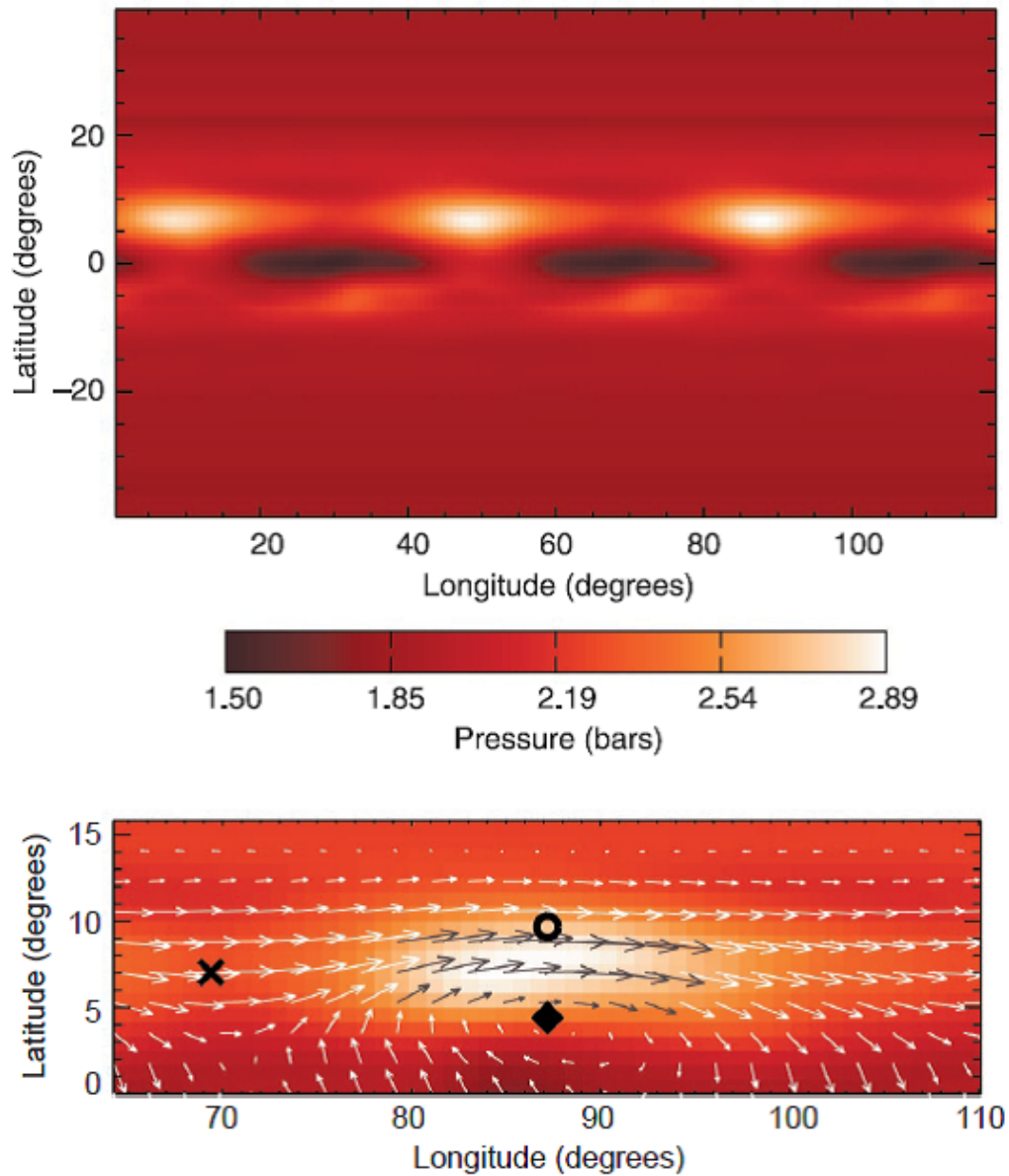


図 1.6: ホットスポットが木星環境上でその形状を維持できるかどうかの数値実験の結果を表した図 [A. P. Showman and T. E. Dowling, 2000]. 65 日の時間積分をした結果を示している. この実験ではホットスポットのパターンに合わせて初期値として高気圧領域を与えている. 上図はホットスポット周辺の圧力分布を示しており, 初期値として与えたパターンが残っていることが見て取れる. 下図は 65 日後のホットスポット周辺の風構造を示したものであり, ホットスポットの南側に大きな時計回りの渦が存在しているのが見える.

1.2.4 ホットスポットの安定性に関する数値シミュレーション

ホットスポットに関する数値シミュレーションとして, GCM (General Circulation Model, 大気大循環モデル) を用いて木星大気全体の対流をシミュレートすることで, ホットスポットが安定して存在することができるかを確認するというシミュレーションが行われている [A. P. Showman and T. E. Dowling, 2000]. ホットスポットに下降気流が発生する要因として, その領域の気圧が周囲よりも高くなっているということが考えられているが, ここでは初期値としてホットスポットが存在するとした領域に人工的に高気圧領域を設定しており, そこから数十から数百日程度の時間積分を行うことで, その高気圧領域によってどのような風構造が作りだされるのか, そして最初に与えた圧力構造が維持されるのかどうか, ということを実験によって求めている. そのシミュレーション結果を図 1.6 に示す.

風構造については, ホットスポットを中心とした渦ではなく, ホットスポットの南側を中心とした時計回りの渦が存在していることがわかる. これは前節で述べたホットスポットの南東側にある時計回りの渦の存在と矛盾しない. また, 高気圧領域は, ある程度以上の圧力を与えた結果, その構造は時間積分後も維持されることがわかった (そのしきい値については, 論文中に記述がなかったため, ここでは議論しない). しかしながら, 初期値として与えた圧力が弱かった場合, この圧力構造は維持されなかった. これは, ホットスポットのような圧力構造が維持されるためには, ある程度大きな惑星規模の擾乱が起こる必要があることを示している. これは, 惑星規模の擾乱が起こらなければ波が伝搬しない, というロスビー波の特徴ともよく一致している. 与えた圧力の違いによるホットスポットの構造の変化の違いを図 1.7 に示す.

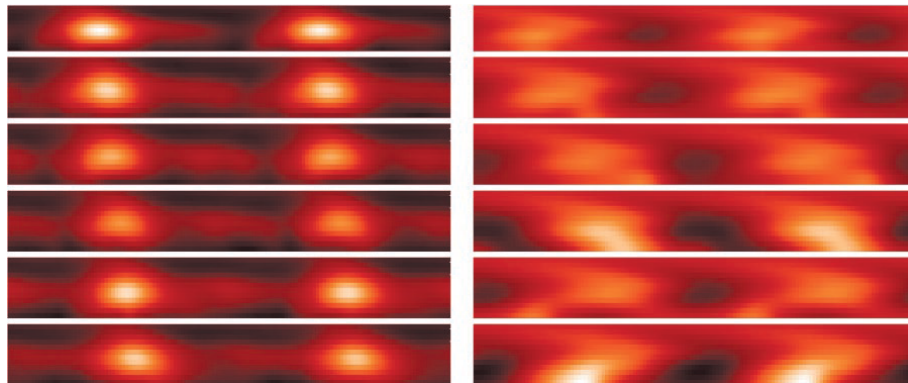


図 1.7: 図 1.6 で行った実験を初期値として与えた圧力を変えて再実験して双方を比較した図 [A. P. Showman and T. E. Dowling, 2000]. 左図は図 1.6 と同じ条件, 右図は高気圧領域の周囲との圧力差を $1/10$ にした際の結果であり, 一番上が 55 日時点, そこから下に向かって 22 時間ごとに図示している. また, 形状の変化がわかりやすいように両者とも同じくらいのコントラストになるようになっているが, 圧力は左図が 1.8 - 3.3 bar, 右図が 1.72 - 1.9 bar であり, 右図のほうがより圧力差を強調してある. 圧力差の小さい右図のほうが, ホットスポットの形がより崩れてしまっていることが分かる.

1.3 研究目的

この $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットの成因を調べることは、木星赤道上における惑星波の振る舞いを理解するために非常に有用であり、これを理解することで、土星やホットジュピターのような他のガス惑星の赤道域における気候やグローバルな大気の循環を理解することに繋がる。しかしながら、これまでの研究では、その成因がロスビー波と関連していること、そしてそれが木星赤道上の環境では長時間維持されることが可能であることまでは推定されているが、その並の直接の発生原因については研究がなされていない。この理由は、ロスビー波の発生原因が非常に多岐に渡っており、特定の現象に関連するロスビー波の発生要因を探ることは、地球上においても非常に難しいためである。

本研究では、ロスビー波の発生要因となる擾乱を出来る限り単純化し、現在の木星環境を再現した大気モデルのもとでその振る舞いを数値計算によって求めることで、木星赤道上におけるロスビー波の振る舞いを理解し、それが $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットの成因となるかどうかを検討することで、惑星波がガス惑星の気候や循環に対してどのような影響を及ぼすかを理解することを最終目標とする。そのための方法として、地球流体電脳倶楽部によって作成された、惑星大気の大循環を理解するために全球の流体計算と放射計算、そして凝結等の状態変化の計算まで含めた数値計算を行う、世界最先端の大気大循環モデルである DCPAM 5 (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model 5) を用い、全球の放射対流計算を行うことで与えた擾乱に対する応答を求め、ホットスポットの成因についての理解を深めていきたいと考えている。

本論文は 5 章構成になっており、2 章で本研究で用いた DCPAM 5 の概要と支配方程式、3 章では行った数値計算の内容、4 章で計算結果とそれに対する解釈と考察、最後に 5 章で本研究のまとめとこれからの展望について述べる。

2 DCPAM 5 による放射対流計算

この章では、DCPAM 5 の概要と本研究に用いた基礎方程式系、そして本研究の計算設定について述べる。詳しい DCPAM 5 の仕様に関しては地球流体電脳倶楽部 HP (<https://www.gfd-dennou.org/>) を参照のこと。

2.1 DCPAM 5 の概要

DCPAM 5 とは、3 次元球面上のプリミティブ方程式を基礎方程式とする惑星大気の大循環を計算するための数値モデルである。このモデルは、地球や火星等の岩石惑星、土星や木星等のガス惑星の双方に対応しており、それぞれの惑星での様々な状況での大気大循環の計算を容易に行うことができる。また、プログラム作成段階において、読みやすく変更しやすいコーディング、マニュアル等のドキュメントの整備、プログラム単位での計算スキームの変更が容易なプログラム構造の 3 点を満たすことを目指しており、これによって自分で一から大気モデルを構築することなく、研究内容に応じた個人による最適なアレンジを加えた大気モデルを作成することが可能となっている。また、本研究では用いていないが、鉛直 1 次元モデル、南北 1 次元エネルギーバランスモデル、南北高度 2 次元軸対称モデル、東西高度赤道断面 2 次元モデル等の、1 - 3 次元の様々な計算を行うこともできる。

このモデルは、先に記したとおり惑星大気の大循環を扱うモデルであり、積乱雲による対流過程などのローカルな気象現象には適していない。しかしながら、 $5 \mu\text{m}$ ホットスポット等の全球規模の現象に対しては非常に有用である。また、 $5 \mu\text{m}$ ホットスポットのように南北非対称な現象を説明するためには、赤道を挟んで南北の緯度帯の比較を行わなければならないため、このような全球計算が不可欠である。よって、本研究においてはこの DCPAM 5 を用い、様々な擾乱に対しての全球の対流計算を行うことで、ホットスポットの原因と推定できる擾乱の条件を絞り込んでいく。

2.2 支配方程式

本研究で用いた DCPAM 5 の計算過程は力学過程と物理過程の大きく 2 つの過程に分かれており、力学過程では物質の移流、物理過程では放射過程と鉛直乱流過程について扱っている。計算の流れとしては、まず始めに放射計算、その後に鉛直乱流の計算を行う。そして最後に主な支配方程式である下記の力学計算を行い、そして時間を進め、また放射計算に戻る、という順になっている。計算のおおまかな流れを図 2.1 に示す。また、この節では支配方程式に関する記述を行うが、詳しい導出はここでは行わない。これについては、地球流体電脳倶楽部 HP 内の DCPAM 5 ドキュメント (<https://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/dcpam5/dcpam5.latest/doc/>) を参照のこと。

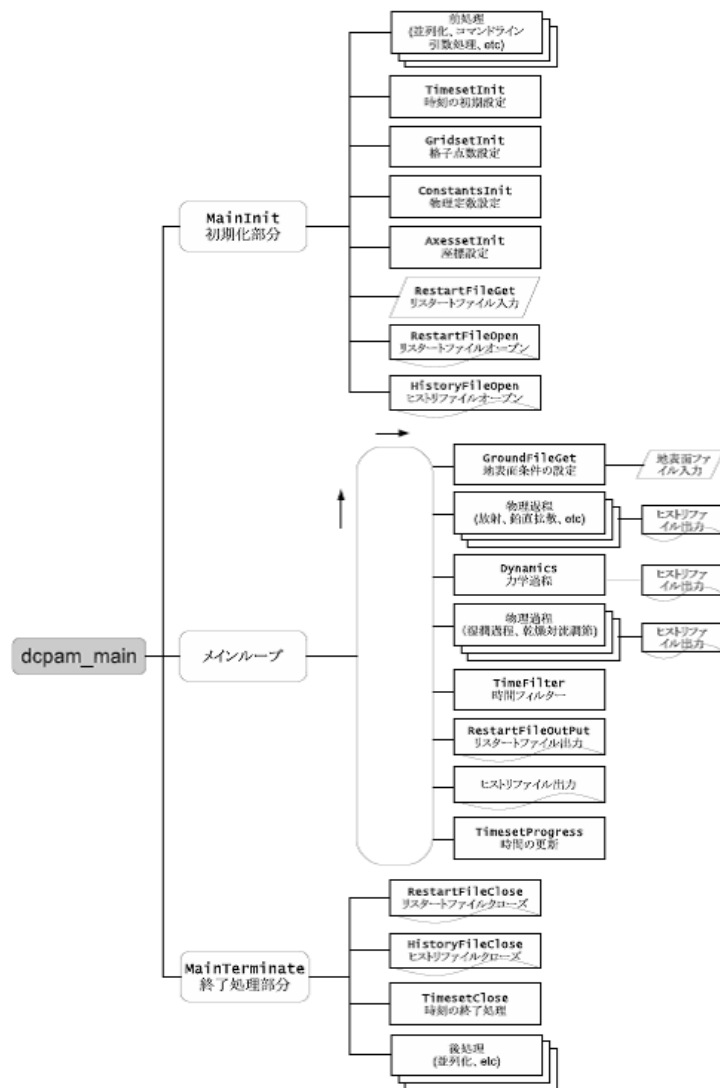


図 2.1: dcpam 5 の計算の概要 [地球流体電脳倶楽部, 2013]. アルファベットで書かれているのはプログラム内で用いられているサブルーチンの名称である. 本研究では, 湿潤過程と乾燥対流調節過程は計算を行っていない.

DCPAM 5 では, 支配方程式系として回転球面上のプリミティブ方程式系を用いている. ここで述べる力学過程とは, 流体の支配方程式における外力項を除いた部分を指す. 外力項については 2.2.1 節, 2.2.2 節で述べている物理過程で計算している. 以下に本研究で用いている方程式を示す.

- 連続の式

$$\frac{d \ln p_s}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{v}_H + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{d\sigma}{dt} = 0$$

- 運動方程式

$$\frac{du}{dt} - fv - \frac{uv}{a} \tan \phi = -\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \frac{RT_v}{a \cos \phi} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \lambda} + F_\lambda$$

$$\frac{dv}{dt} + fv - \frac{v^2}{a} \tan \phi = -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} - \frac{RT_v}{a} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \phi} + F_\psi$$

- 熱力学の式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT_v}{C_p} \left\{ \frac{\partial \ln p_s}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_s \ln p_s + \frac{1}{\sigma} \frac{d \ln p_s}{dt} \right\} + \frac{Q^*}{C_p}$$

- 静力学平衡の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}$$

それぞれの記号の意味については表 2.1 にまとめてある. なお, 鉛直方向に関しては圧力座標で計算を行っており, 実際の計算ではグリッドの取り方を圧力座標に対してではなく z 座標に対して一定の間隔で取っていることに注意してほしい. また, 式の導出過程において, 大気の層が惑星半径に比べて極めて薄いという近似を行っている.

表 2.1: 力学過程で用いる各パラメータの意味

記号	意味	記号	意味	記号	意味
ϕ	緯度	f	コリオリパラメータ	T_v	仮温度
λ	経度	a	赤道半径	T	実温度
σ	p/p_s	v_H	風の惑星に対する角速度	p_s	$\sigma = 1$ での気圧
		R	気体定数	p	その点での気圧
u	東向き風の色度	C_p	乾燥大気の色定圧比熱	F_λ, F_ϕ	緯度 (経度) 方向の外力
v	西向き風の色度	Φ	ジオポテンシャル	Q^*	外部からの熱

2.2.1 物理過程-放射過程

本研究では, 計算の簡略化のために放射伝達の際の散乱過程は考慮していない. 用いた方程式系を以下に記す.

- 加熱率

$$Q = \frac{1}{C_p \rho} \frac{\partial F}{\partial p}$$

- 放射伝達方程式

$$F(\tau) = F^+(\tau) - F^-(\tau)$$

$$F^+(\tau) = \pi B_s \tau_o(\tau_s, \tau) - \int_{\tau}^{\tau_s} \pi B(\tau') \frac{d\tau_o(\tau, \tau')}{d\tau'} d\tau'$$

$$F^-(\tau) = \int_0^{\tau} \pi B(\tau') \frac{d\tau_o(\tau, \tau')}{d\tau'} d\tau'$$

- 大気透過率

$$\tau_o(\tau, \tau') = \exp[-\alpha\{|\tau(p) - \tau(p')|\}]$$

- 光学的深さ

$$\tau(p) = \tau_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^2$$

それぞれの記号の意味については表 2.2 でまとめてある. なお, 光学的深さの式については, *Schneider and Liu* (2009) で用いられた式を利用している. なお, 参照気圧とは光学的深さの基準となる気圧を意味しており, 本研究では 3 bar 面の光学的深さを基準としている.

表 2.2: 放射過程で用いる各パラメータの意味

記号	意味	記号	意味
Q	加熱率	B	プランク関数
ρ	大気密度	B_s	$\sigma = 1$ でのプランク関数
F	放射フラックス	τ, τ_L	光学的深さ
F^+, F^-	放射 (吸収) フラックス	τ_s	$\sigma = 1$ での光学的深さ
p_0	参照気圧	$\tau_{L,0}$	参照気圧での光学的深さ

2.2.2 物理過程-鉛直乱流過程

鉛直乱流過程は, 以下の式を用いている.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{VD} = g \frac{\partial F_{m,x}}{\partial p}$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{VD} = g \frac{\partial F_{m,y}}{\partial p}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{VD} = \frac{g}{C_p} \frac{\partial F_h}{\partial p}$$

$$\left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{VD} = g \frac{\partial F_q}{\partial p}$$

$$F_{m,x} = -\rho K_m \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$F_{m,y} = -\rho K_m \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$F_h = -C_p P \rho K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$F_q = -\rho K_q \frac{\partial q}{\partial z}$$

各記号の意味は表 2.3 にまとめてある.

表 2.3: 鉛直乱流過程で用いる各パラメータの意味

記号	意味
q	水蒸気量
θ	温位
$F_{m,x}, F_{m,y}, F_h, F_q$	運動量, 熱, 水蒸気量フラックス
K_m, K_h, K_q	運動量, 熱, 水蒸気量の拡散係数

3 シミュレーション

本研究では、ホットスポットが存在すると推定できる一つの必要条件として、シミュレーションと観測双方で確認されたホットスポットの南の時計回りの渦が存在するかどうかを、DCPAM 5 を用いた全球の対流の数値計算によって求めた。また、ホットスポットを形成すると考えられる擾乱として、GRS (Great Red Spot, 大赤斑) を模した単純な南北風の擾乱を用いた。この章では、まず GRS の概要、及び初期値としてこの GRS を用いた理由を簡単に述べ、次に実際に与えた初期設定と擾乱について述べる。計算結果に関しては次章に記してある。

3.1 GRS

GRS とは、木星の 22°S を中心に南北 10° 、東西 20° ほどの範囲に広がる、非常に安定した高気圧性の巨大な渦である。現在は経度 $+45^{\circ}$ 付近に存在し、東向きに $0.7^{\circ}/\text{month}$ 程度の速度で動いているが、その位相速度は $-5 - 1^{\circ}/\text{month}$ と時期によって大きく異なる [J. H. Rogers, 2008]。その風速は最大で 110m/s にも達し、木星の南半球では最も特徴的な気象現象となっている。GRS という名称は、可視光で観測した際に赤い色をしていることから名付けられたもので、この色の原因は木星深部の何らかの物質が上昇気流によって木星大気上層に運ばれ、それが太陽からの紫外線と反応して赤く発色しているためであると考えられている。また、その大きさから、この現象は木星大気全体の対流に大きな影響を与えていると考えられている。HST の観測によって得られた GRS の画像を図 3.1 に示す。

本研究では、北半球には存在するが南半球には存在しないホットスポットの南北非対称性を説明するため、南半球にしか存在しないこの GRS をホットスポットと関連する木星

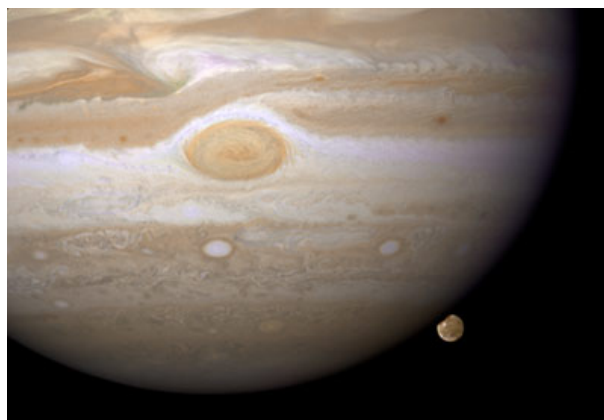


図 3.1: HST による 2007/4/9 の木星南半球の画像 [NASA]。中央付近に見られる茶色の楕円形の構造が大赤斑である。

大気の擾乱の第一候補として、この GRS を簡略化した南北風の擾乱を木星大気に与えることでホットスポットに対応する条件を再現できるかどうかを計算した。

3.2 計算設定

本研究では、木星の気象条件を再現するため、初期場として、先行研究 [N. Barrado-Izazzire et al., 2013] で得られた風速場を簡略化した東西風を与えた。その後、GRS に相当する擾乱を与えるため、 22°N を中心に南北 15° 、東西 15° の範囲に、西半分には -110 m/s 、東半分には $+110\text{ m/s}$ の南北風を与えて時間積分を行い、これを GRS が存在しない状態で時間積分したものと比較をすることで、GRS の擾乱による木星大気への影響を観測し、それがホットスポットの成因となりえるかどうかを考察する。なお、気体の凝結による影響は無視している。また、仮想的な地表面を 20 bar 高度に置き、地表からのフラックスは存在しないものとし、上部境界でも各フラックスの値は 0 として計算している。

今回用いた風速以外の初期値と計算設定を表 3.1 に、東西風速の初期値を表 3.2 および図 3.2 に、南北風速の初期値を 3.3 に示す。東西風速の参照元については図 1.4 を参照のこと。

表 3.1: 計算設定と初期値 (風速を除く)

初期値		時間設定	
温度 (T)	地表面気圧 (p_s)	時間解像度	積分時間
110 K (一様)	20 bar	20 min	300 day
空間解像度			
緯度方向	経度方向	鉛直方向	
32	64	12	

表 3.2: 東西風速の初期値

南北緯度 (deg)	風速	南北緯度 (deg)	風速
90 - 35	0	15	-30
30	-30	7.5	150
22.5	90	0	90

$35^{\circ}\text{S} - 35^{\circ}\text{N}$ の間は上記の各緯度の値を直線でフィッティングをかけ、それ以外の領域の風速は 0 とおいている。図 3.2 参照のこと。

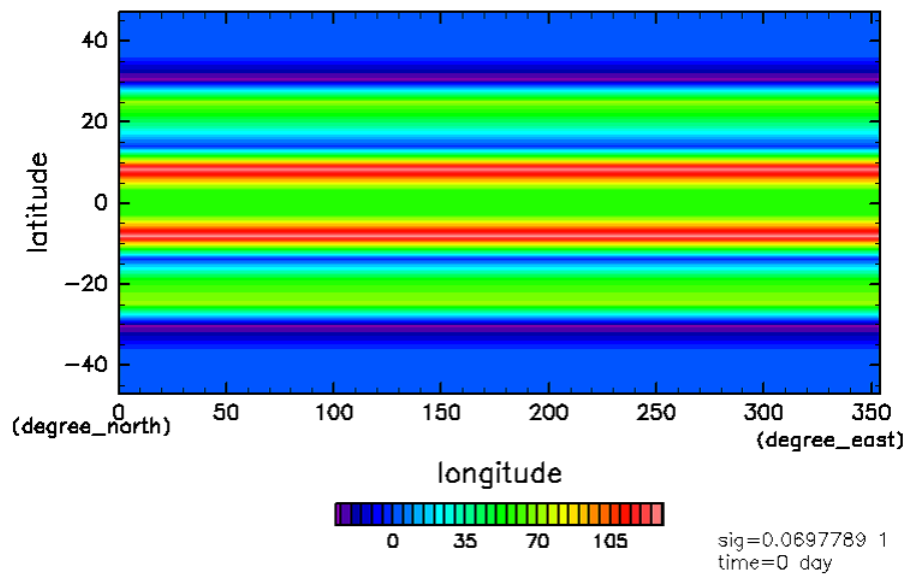


図 3.2: 東向き風の初期値の xy 平面図. 1 bar 面の分布を表しているが, 風速は鉛直方向には一定である.

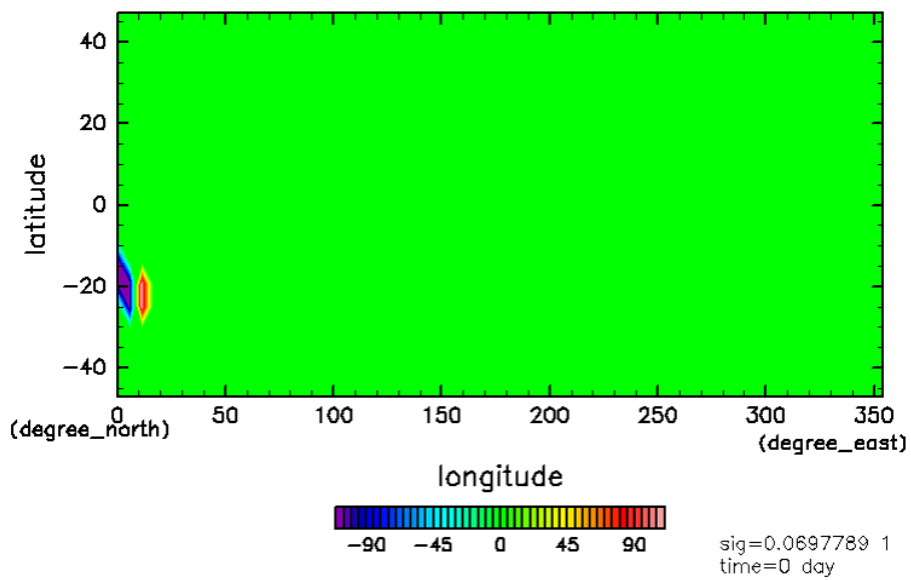


図 3.3: 北向き風の初期値の xy 平面図. 1 bar 面の分布を表しているが, 風速は鉛直方向には一定である. 22.5°S を中心に南北 15°, 東西 15° の領域を作り, その西半分は -110 m/s, 東半分は 110 m/s の北向き風を与えている.

4 5 μm ホットスポットの成因

この章では、まず 4.1 節において、GRS が存在する場合としない場合の計算結果を比較し、その結果について簡単に考察する。その後 4.2 節で GRS が存在する場合の緯度ごとの風速の変化を比較し、その結果について簡単に考察し 4.3 節で 2 つの結果について本格的に議論と考察を行う。

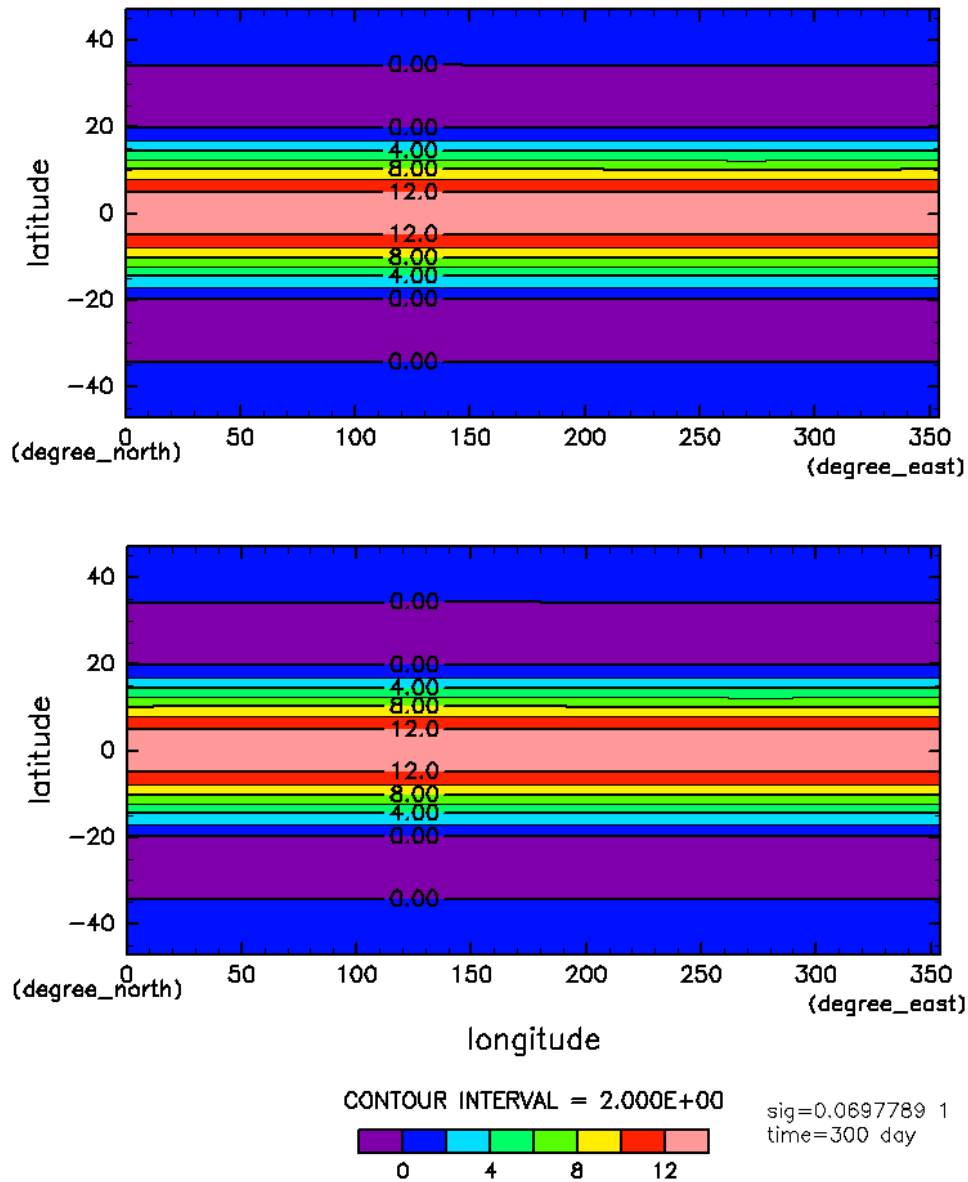


図 4.1: 300 日積分後の東向き風の強さを表した図. 上図が GRS 無し, 下図が GRS 有りの場合の図である. このように, 目立った差は全く見られなかった.

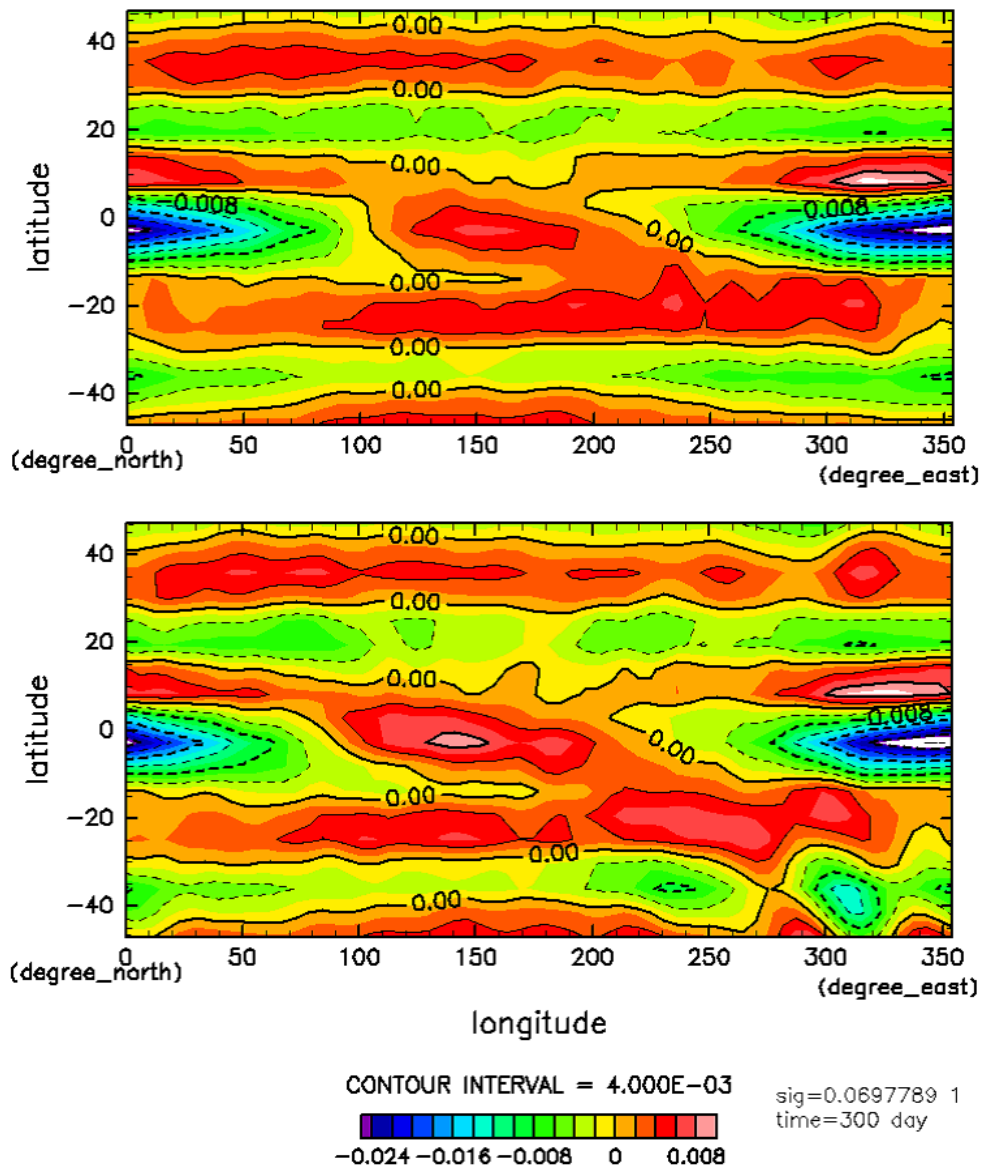


図 4.2: 300 日積分後の北向き風の強さを表した図. 上図が GRS 無し, 下図が GRS 有りの場合の図である. 中央少し上辺りに, 1 波長の波構造の僅かな乱れが見られる.

4.1 GRS を模した擾乱の有無に対する計算結果の比較

図 4.1 は, GRS が存在する場合と存在しなかった場合の計算結果を東西風に関して図に表したものである. ここから分かる通り, 東西風に関しては目立った差は全く見られなかった. この原因は恐らく, 初期場として与えた東西風に擾乱による東西風がなめされてしまい, 違いとして現れなかったのだと考えられる. また, 東西風の強度も初期値に比べると非常に弱くなっている. これは非常に安定している現実の木星の風構造とは一致しない.

図 4.2 は、上記の計算結果を南北風に関して表したものである。こちらにも 2 つの図に目立った差は見られなかったが、波構造に小さな差が見られた。この図からわかる両者に見られる特徴として、 8°N 付近に大きな波数 1 の波構造が見られる。この波構造に関して、下の GRS が存在した場合の図において、上図の存在しない場合より少し波構造が崩れていることがわかる。また、下図の右下に見える波構造のようなものは、初期値として与えた GRS が弱まったものである。

この波構造の崩れに着目し、 8°N 付近の南北風の時間変化を追ったのが図 4.3 である。この図から、20 日付近には東西方向の波長が 40° ほどの波構造が見えていることが分かる。これが全球に伝搬した場合、波数がおよそ 9 程度の、ホットスポットと関連すると考えられる波と同じような波となる。また、この波構造は時間とともに西進していることがわかる。しかしながら、この波構造は時間とともに減衰し、代わりに 100 日付近から波長 1 の波構造が卓越し始める。この結果と GRS を与えなかった場合の結果から、強制力を与えなかった場合のこの緯度帯の波構造の平衡状態での構造は、この 1 波長の大きな波が卓越する構造なのではないかと推測できる。しかしながら、少なくとも 20 日付近では間違いなくこの小さな波構造は存在しており、かつこの特徴はホットスポットの特徴ともよく一致している。

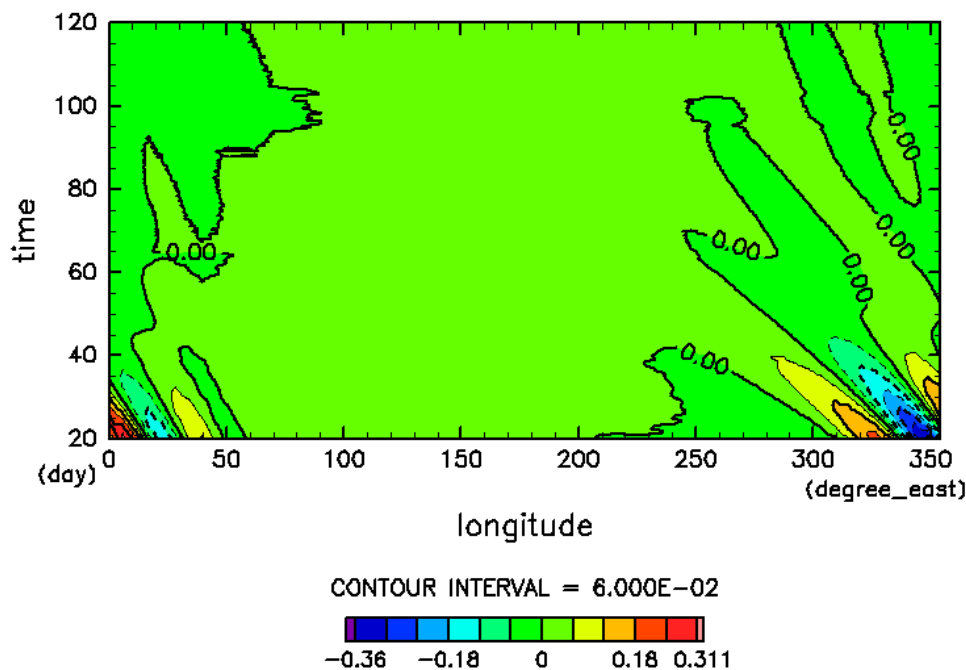


図 4.3: GRS を与えた場合の 20 - 120 日での北向き風の時間発展の図。20 日付近に見えている西進する 40° ほどの波長の波が時間とともに弱まり、代わりに波数 1 の大きな波構造が卓越してくるのが分かる。

4.2 擾乱に対する応答の緯度ごとの比較

ここでは前節でホットスポットのような波構造が見られた GRS を簡略化した擾乱を与えた方のシミュレーション結果に対して、その他の緯度での南北風の時間変化の結果を記す。図 4.4 は左上からそれぞれ 8°N , 13°N , 2°N , 8°S における 20 - 120 日目の期間の南北風の時間変化を図にしたものである。ここからはこの図を元に結果を議論していく。

4.2.1 北半球での緯度による違い

まず 8°N と 13°N についてだが、この 2 枚の図ではどちらにも 20 日付近に細かい波構造が見える。また、波長に関してはほとんど違いがない。相違点としては、まず 13°N のほうが南北風の風速が弱いことが挙げられる。これは初期に与えた擾乱の位置から離れているためだと考えられるが、これについては後でもまた議論する。そしてもう一つの相違点だが、波数 1 の大きな波が存在しないことである。これによって細かい波構造が大きな波構

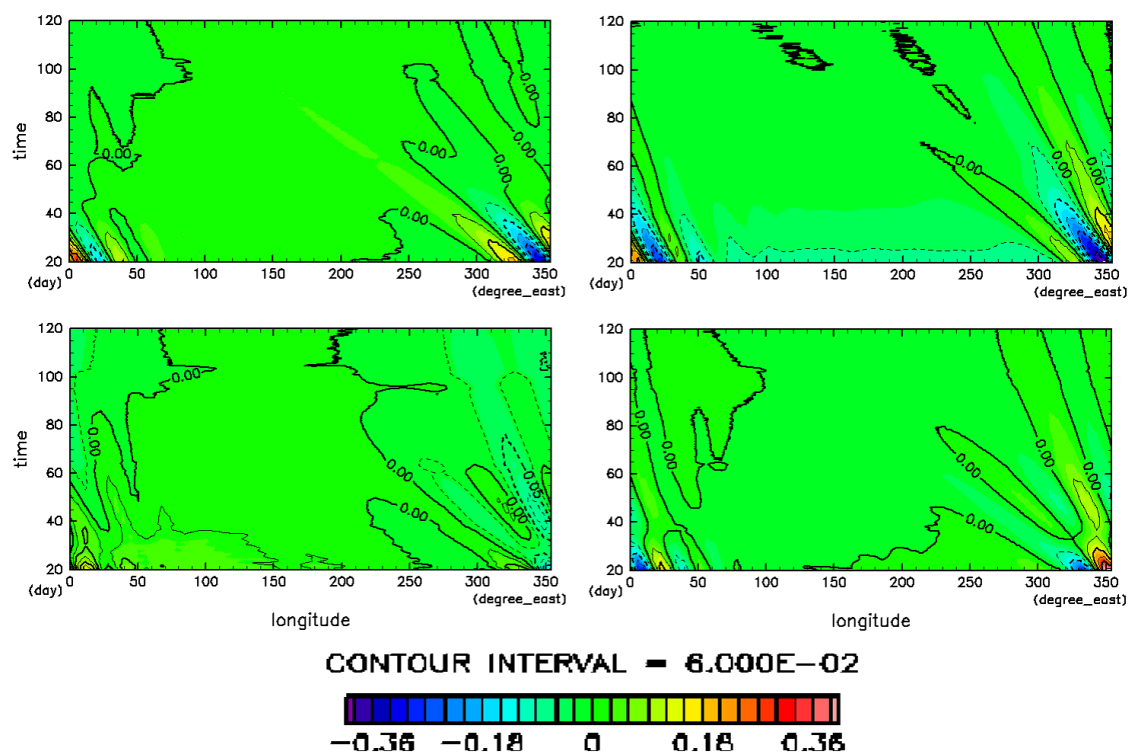


図 4.4: GRS を与えた場合の 20 - 120 日での北向き風の時間発展の図。左上から右下に向けて順に 8°N , 13°N , 2°N , 8°S での北向き風の強さを表している。全ての緯度で共通の特徴として、20 日付近に存在する波長が 40° ほどの波構造と、その後時間発展とともにその構造が崩れていくことが挙げられる。

造に隠されず、120 日後までその跡を残している。また、この波について、80 日目辺りで波が分裂しているのが見て取れる。これは 8°N の方でも少しわかりにくいの確認できる。

次に 8°N と 2°N だが、ここでも両者で 20 日目付近に細かな波構造が見える。また、波長に関してもほとんど違いがない。しかしながら、南北風の強さに関しては、 8°N のほうが強くなっている。これは、初期値として与えた GRS の擾乱からの距離が 2°N のほうが近いことと反した結果となった。また、もう一つの差異として、 2°N の南北風の波構造のほうが比較的早く崩れてしまうというのがわかる。また、経度 50° 付近の北向き風を見ると、西進速度が遅くなっていることが分かる。

4.2.2 北半球と南半球での違い

南北どちらの図にも、20 日付近に細かい波構造が見え、またその波長にも違いが見られない。南北風の強さには違いが見られるが、これは GRS の擾乱を与えた緯度からの距離の違いによるものだと考えられる。その他の特徴については、目立った差は見られなかった。これはこの波構造がほぼ南北対称であることを示している。また、もう一つ大きな特徴として、 8°S と 8°N の南北風の強さの差と 8°N と 13°N の南北風の強さの差を比較すると、距離は前者のほうが離れているにもかかわらず、その減衰量は後者のほうが大きかった。

4.3 計算結果に対する考察

ここでは、これまでに記してきた結果についての議論と考察を行う。

まず、時間が経つにつれて東西風が弱くなってしまったことに関してだが、これは東西風を維持できるような強制力が考慮されていなかったためである。本研究では東西風を維持する機構については議論しないため、今後この風速場を維持できるように、計算式中に風速を減衰させないような強制項を挿入する必要がある。

次に、20 日付近に確認された波構造だが、これは西進する、という特徴と、 2°N において他の緯度よりも早く減衰し、さらに西進速度も遅くなるという特徴から、ロスビー波の表れであると考えられる。これは、ロスビー波の復元力となるベータ効果は緯度が低くなるほど弱く、したがってロスビー波には、緯度が下がれば下がるほど 1.3 節にある式の β 項が弱まることで伝搬速度が遅くなり、また波自体もより早く減衰してしまう、という特徴があり、それが今回確認された南北風の波構造の特徴と一致するためである。しかしながら、確認された波構造は 2 波長分しか存在せず、当然観測結果と一致しない。これは与えた GRS の擾乱が、波が東西方向に伝搬し終わる前に弱まってしまったためであると考えられる。そのため、この実際は安定して存在している GRS を存在し続けさせるような強制力を与えるか、もしくは GRS を模した南北風を初期値としてではなく強制力として計算式に組み込む必要がある。この方法については、今後よく検討していく必要がある。

また、 8°N の南北風の波構造の強さがその南北の緯度よりも強く、かつ 8°S と 8°N よりも 8°N と 13°N の強さの差のほうが大きかったことに関してだが、これは単に元となった擾乱からの距離と上で述べたベータ項だけで波の強さが決定されているのではなく、緯度によってこの波の現れやすさに違いがあるのではないか、ということが考えられる。これについては、擾乱の発生緯度や強さ、規模などを変化させ、同じような結果が得られるか、という数値実験をすることによって確認することができ、これは今後出来る限り早く確認する予定である。

最後に、波構造がほぼ南北対称に見えたことに関してであるが、これは実際のホットスポットは北半球には存在しないことと大きく異なっている。この原因として考えられるのは、何か他の要因 (例えば GRS 自身の擾乱) によって波構造自体が壊されている、波構造は存在しているが、その他の原因でその緯度に雲が発生しホットスポットが覆われてしまっている、そもそもホットスポットの形成要因が GRS によるものではない、の 3 つである。1 つ目に関しては、上でも述べたとおり GRS を何らかの形で存在させ続けることでこれを確認することができる。2 つ目に関しては、アンモニアの凝結を無視している現在の計算ではその雲の存在を確認することができないため、アンモニア雲の凝結も考慮に入れ、雲の分布を確認できるようにこの DCPAM を改変せねばならない。3 つ目に関しては、前の 2 つに関してきちんと把握できてから議論されるべきであるため、ここでは議論しない。

5 まとめ及び今後の展望

5.1 本研究のまとめ

木星の 8°N 付近には、 $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットと呼ばれる雲の少ない領域があることが知られている。これはその領域に下降気流があるためだと考えられており、その動きとホットスポットの数の関係から、木星赤道付近に存在するロスビー波との関連が示唆されている。このホットスポットの成因を調べることは、木星における惑星波の振る舞いを知る上で非常に重要であり、これを理解することは、ガス惑星の赤道域の気候や全球的な対流を理解する上で非常に重要である。本研究では、このホットスポットの成因を調べるため、DCPAM 5 という全球的な惑星大気の大循環モデルを用いて対流シミュレーションを行った。

数値実験の初期値として木星の東西の風速場、ホットスポットを形成する波の原因の第一候補である GRS を簡略化した南北風を与えて数値計算を行った結果、ホットスポットに類似するような南北風の擾乱が見られた。この擾乱は東西風には見られず、また時間とともに減衰してしまっただが、これは東西風、GRS を模した南北風共に実際の木星では非常に安定した構造なのにもかかわらず、その強制力となるようなパラメータを与えていなかったためと考えられる。そのため、今後はその 2 つの風速場を維持させるため、シミュレーションの計算式に新たに項を加える必要がある。また、南北の非対称性については再現できなかったため、これを再現する方法についてもこれから模索していかなくてはならない。そして、 8°N 付近にホットスポットと対応するであろう波構造が周囲よりも強く現れる領域が出現したが、これについては与えた擾乱のどのパラメータが効いているのか、それともどのようなパラメータを振ったとしてもその領域の性質として波構造が現れやすいのか、ということについてこれから調べていく必要がある。

5.2 $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットの数値シミュレーションに関する今後の展望

本研究により、木星の赤道域の $5\ \mu\text{m}$ ホットスポットの成因となるロスビー波が、GRS 由来のものなのではないか、という仮説を建てることができた。しかしながら前節で述べたように、木星中で安定して存在する大構造を強制力として与えられておらず、結果として起こった波構造もすぐに減衰してしまった。今後はこれを解決する方法を模索していく必要がある。また、今回は与える擾乱を変化させる実験は行っておらず、全ての擾乱に対して同じような結果が返ってくる可能性もある。よって、今後は更に様々な条件下での実験を重ね、その条件の変化による応答を調べていかなくてはならない。また、解像度を高くすることも有用である。これは、今実験ではホットスポット周辺の緯度帯には 2°N , 8°N , 13°N の 3 つの緯度にしかがグリッドが存在せず、この波構造が本当にホットスポットに相当するものなのかを正確に議論することは難しいためである。今後は今実験の精度を高め、この仮説をより確からしいものにするために、より詳細で、かつより現実の木星大気に近い環境で数値実験を行う必要がある。

6 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援を頂きました。この場を借りて感謝の意を表させていただきます。

指導教員である渡部重十教授には、研究テーマの決定から研究の進め方まで、非常に多くのご支援をいただき、また研究の進め方についても何度も指導していただきました。また、教授自身からテーマを与えるのではなく、なかなか研究テーマが決定せずいくら時間がかかったとしてもあくまで私自身に興味あるものを見つけさせる、というその指導方針によって、非常に興味深い研究対象を見つけ、研究を進めることが出来ました。渡部教授に道を示して頂いたお陰で、本研究だけでなく、これからの研究者として歩む道も、非常に素晴らしい物になりました。心から感謝の意を申し上げます。

高橋幸弘教授には、研究を進める以前、研究テーマを決定する段階で、様々なご支援を頂きました。様々なプロジェクトへの参加のお誘い、興味深いお話など、非常に多くのアドバイスを頂き、本当に感謝いたしております。

GFD 研究室の小高正嗣助教授には、大気モデルの選択にあたって、DCPAM 5 を用いるという、本研究の肝となる非常に貴重な助言を頂きました。

惑星宇宙グループ探査観測ユニットの皆様には、セミナー等で様々なアドバイスやご指摘をいただき、また様々なテーマの貴重なお話をしていただくことで、自分の研究の助けになり、また良い刺激を受けることが出来ました。

探査観測ユニットの同輩である合田雄也君とは、調べた木星の知識をお互いに共有しあうことで、研究の助けになるとともに、本研究を進める上で非常に良い刺激となりました。

また、惑星宇宙グループに所属する教員、研究員、先輩や同期、秘書の方々には、様々な分野からのアドバイス及び研究における様々な支援を頂きました。

最後に、本研究を進めるにあたり、地球流体電脳倶楽部の開発した大気モデルであるDCPAM 5 を使用させていただきました。また、本論文の書式には、地球流体電脳倶楽部のスタイルファイルである電脳スタイル TEX マクロ (<http://www.gfd-dennou.org/arch/cc-env/TeXmacro/dennou/dennousty6/DOC/>) を用いています。この場をお借りして、御礼申し上げます。

7 参考文献

A. P. Showman and T. E. Dowling, Nonlinear Simulations of Jupiter's 5-Micron Hot Spots, *Science*, **289**, 1737 (2000).

D. S. Choi, A. P. Showman, A. R. Vasavada, A. A. Simon-Miller, Meteorology of Jupiter's equatorial hot spots and plumes from *Cassini*, *Icarus*, **223**, 832 (2013).

J. Arregi, J. F. Rojas, A. Sánchez-Lavega, and A. Morgado, Phase dispersion relation of the 5-micron hot spot wave from a long-term study of Jupiter in the visible, *Journal of Geophysical Research: Planets*, **111**, Issue E9 (2006).

J. H. Rogers, The accelerating circulation of Jupiter's Great Red Spot, *Journal of the British Astronomical Association*, **118**, 14 (2008).

M. Allison, Planetary Waves in Jupiter's Equatorial Atmosphere, *Icarus*, **83**, 282 (1990).

N. Barrado-Izagirre, J. F. Rojas, R. Hueso, A. Sánchez-Lavega, F. Colas, J. L. Dauvergne, D. Peach and IOPW Team, Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes, *Astronomy & Astrophysics*, **554**, A74 (2013).

T. Schneider, and J. Liu, Formation of jets and equatorial superrotation on Jupiter, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **66**, 579 (2009).

杉山 耕一郎, 小高 正嗣, 中島 健介, 林 祥介, 木星大気を念頭においた雲対流モデルの開発, *ながれマルチメディア* ながれ 28 (2009).

地球流体電脳倶楽部, dcpam 5 支配方程式系とその離散化 (https://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/basic_equations/pub/basic_equations.pdf) (2013).

地球流体電脳倶楽部, dcpam 5 コード解説 (https://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/code_description/pub/code_description.pdf) (2013).

HUBBLESITE Gallery (<http://hubblesite.org/gallery/>)