

修士学位論文

水惑星数値実験に見られる熱帯域対流活動の組織化:
赤道対称成分, 反対称成分の振る舞い

2011年2月4日

地球惑星科学専攻

093S412S

島津 通

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

要旨

Wheeler and Kiladis(1999) において、現実の熱帯大気の観測データに対してなされたスペクトル解析を、Aqua Planet Experiment Project で集められた各グループの計算結果に対して行い、解析結果を各グループ、Wheeler and Kiladis(1999) の結果と比較した。

その結果 control 実験では、全ての GCM でケルビン波が再現されていた。しかし flat 実験では、全ての GCM でケルビン波のシグナルが現れなかった。このことから、ケルビン波は SST の緯度分布に依存することが理解された

混合ロスビー重力波 (ERG) に関しては、全ての GCM の全ての実験でそのシグナルを確認することは出来なかった。SST が赤道対称でない control-5N 実験においても現れなかったことから、ERG の駆動に必要な不可欠なパーツが、APE の実験設定に欠いていることが推測された。

目次

第1章	はじめに	3
1.1	赤道波	4
第2章	データと手法	6
2.1	計算設定	6
2.2	解析手法	8
第3章	解析結果と考察	10
第4章	結論	21
	謝辞	22
	参考文献	23

目 次

1.1	赤道波の分散曲線	5
2.1	SST 分布	7
3.1	熱帯域 (15S-15N) の OLR のスペクトル解析結果	11
3.2	control 実験の対称成分のスペクトル解析結果 (AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, FRCGC, GFDL, GSFC)	12
3.3	control 実験の対称成分のスペクトル解析結果 (K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO)	13
3.4	flat 実験の対称成分のスペクトル解析結果 (AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, GFDL, GSFC)	14
3.5	flat 実験の対称成分のスペクトル解析結果 (K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO)	15
3.6	control 実験の反対称成分のスペクトル解析結果 (AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, FRCGC, GFDL, GSFC)	16
3.7	control 実験の反対称成分のスペクトル解析結果 (K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO)	17
3.8	Control-5N 実験の反対称成分のスペクトル解析結果 (AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, GFDL)	19
3.9	Control-5N 実験の反対称成分のスペクトル解析結果 (GSFC, K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR)	20

第1章 はじめに

今現在、気象学にとって計算機を用いた数値シミュレーションは大きな役割を果たしており、世界各国の研究者によって、いくつもの数値モデルが開発されている。気象の変化を調べるための数値モデルを大気大循環モデル (General Circulation Model, GCM) と呼ばれる。これら GCM の中では、大気の運動を支配する基礎方程式 (運動方程式, エネルギー保存則, 質量保存則など) を離散化して解くことで結果を得るのだが、まだ物理的に完全に説明できていない項 (エネルギー保存則における熱源の項など) の存在や、有限の時空間分解能で離散化するため、それより細かい現象 (積雲など) は表現できないなどの問題点が存在する。これらを解決するために、GCM によって陽に表現できない現象などを評価し、モデルに組み込むためにパラメタリゼーションと呼ばれる一種の経験式が使用されている。GCM においては、特に積雲の効果を評価し、モデルに組み込むために導入された積雲パラメタリゼーションが重要であり、例えば、次のようなものが存在する。

- 湿潤対流調節 (Manabe et al, 1965)
- kuo スキーム (Kuo, 1974)
- 荒川-シュバートスキーム (Arakawa and Schubert, 1974)

しかし、これらのいずれを使用するかによってモデルのふるまいが大きく変わることが、知られており (Numaguti and Hayashi, 1991), 積雲パラメタリゼーションを含んだ GCM の共通する振る舞いはいまだに知られていない。

そこで、世界各地で開発が進められている GCM において、地形の効果などを全て取り除いて、地球表面を全て水で覆い、厳密に規定された海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) を用いるなどの統一された計算条件で、GCM で計算を行い、その結果を評価・比較し、モデルに共通するふるまいを調べ、最終的に現行のモデルに対して、ベンチマークを提供することを目指したのが、水惑星実験プロジェクト (Aqua Planet Experiment, APE) である。APE では各モデルのふるまいを正確に比較できるように、計算設定が詳細に規定されており、その計算設定に則った数値計算の結果を、14 のグループが提供している。

本論文では、APE において各グループから提供された計算結果を元に、現実の大気から得られた観測データに対して、スペクトル解析を行った Wheeler and Kiladis(1999)(以降、WK1999 と呼ぶ) と同一の手法を用いて解析を行い、その結果を比較し、モデルの振る舞いを調べることを目的としている。

本論文の構成は次のとおりである。第 1 章 1 節において、Matsuno(1966) において示された赤道波について簡単にまとめる。第 2 章では、APE の詳細な実験設定および今回行うスペクトル解析手法の詳細について述べる。第 3 章では、各グループの解析結果を赤道対称成分、反対称成分の観点からまとめ、その結果に対して考察を行う。第 4 章は、結論である。

1.1 赤道波

ここでは、Matsuno (1966) で示された、赤道波について、簡単におさらいする。Matsuno(1966) は、線形化された赤道 β 面浅水方程式に対して、時間・東西方向に波形の解を仮定し、そこから赤道波の分散関係、空間構造を導出している。こうして求められた赤道波には、次の 4 種類がある。

- 慣性重力波
- ロスビー波
- 混合ロスビー重力波 (Mixed Rossby Gravity wave, MRG)
- ケルビン波

慣性重力波とロスビー波は、 n 次のエルミート多項式で表され、 n が南北風 (v) の子午線方向の節の数を表している。従って、 n が奇数のときに赤道対称の、 n が偶数のとき、赤道反対称の分布となる。また、MRG は赤道反対称、ケルビン波は赤道対称な分布となる。

v の場合は、この関係性が逆となり、 n が奇数のときに赤道反対称の、 n が偶数のとき、赤道対称の分布になる。

第 3 章の解析においては、降水量のデータを、対称成分・反対称成分に分けてそれぞれについて、スペクトル解析を行う。従って、対称成分の解析結果には、 $n=1$ の慣性重力波、ロスビー波とケルビン波が、反対称成分の解析結果には、 $n=2$ の慣

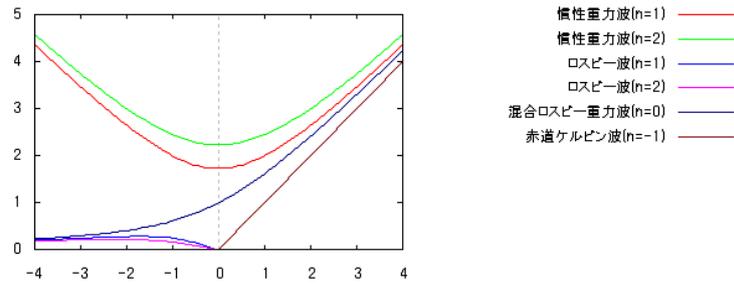


図 1.1: 赤道波の分散曲線

横軸は k , 縦軸は ω である. それぞれ赤色は $n = 1$, 緑色は $n = 2$, 水色は $n = 0$, 橙色は $n - 1$ を表している. また, $k > 0$ の領域は東進する波動を, $k < 0$ の領域は, 西進する波動の分散関係を表している.

性重力波, ロスビー波と MRG が載せられている. 図 (1.1) は, 赤道波の分散関係をグラフにしたものである.

第2章 データと手法

ここでは、APE で規定された計算設定の詳細と本論文で行った解析手法について述べる。

2.1 計算設定

APE では、SST をはじめとして、結果を正確に比較できるように計算設定が詳細に定められている。この節では、その詳細についてまとめている。

境界条件に関して APE では、表面は全て水で覆われているとし、海氷は考慮しない(つまり、 $SST \geq 0$)。そして、SST は次の 8 種類が規定されており、次のように数式で厳密に与えられている。

$$\begin{aligned}
 1. \text{Contorl} : \quad T_{S1}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} 27 \left(1 - \sin\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right)^\circ C & : -\frac{\pi}{3} < \phi < \frac{\pi}{3} \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 2. \text{Peaked} : \quad T_{S2}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} 27 \left(1 - \sin\left(\frac{3|\phi|}{\pi}\right)\right)^\circ C & : -\frac{\pi}{3} < \phi < \frac{\pi}{3} \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 3. \text{Flat} : \quad T_{S3}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} 27 \left(1 - \sin^4\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right)^\circ C & : -\frac{\pi}{3} < \phi < \frac{\pi}{3} \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 4. \text{Qobs} : \quad T_{S4}(\lambda, \phi) &= \frac{(T_{S1} + T_{S3})}{2} \\
 5. \text{Control-5N} : \quad T_{S5}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} 27 \left(1 - \sin^2\left(\frac{90}{55} \left[\phi - \frac{\pi}{36}\right]\right)\right)^\circ C & : \frac{\pi}{36} < \phi < \frac{\pi}{3} \\ 27 \left(1 - \sin^2\left(\frac{90}{65} \left[\phi - \frac{\pi}{36}\right]\right)\right)^\circ C & : -\frac{\pi}{3} < \phi < \frac{\pi}{36} \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 6. \text{1KEQ} : \quad T_{S6}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} \chi \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_d}\right]\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{\phi}{\phi_d}\right]\right)^\circ C & : \begin{cases} (\lambda_0 - \lambda_d) < \lambda < (\lambda_0 + \lambda_d) \\ -\phi_d < \phi < \phi_d \end{cases} \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 7. \text{3KEQ} : \quad T_{S7}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} \chi \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{\phi}{\phi_d}\right]\right)^\circ C & : -\phi_d < \phi < \phi_d \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases} \\
 8. \text{3KW1} : \quad T_{S8}(\lambda, \phi) &= \begin{cases} \chi \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{\phi}{\phi_d}\right]\right)^\circ C & : -\phi_d < \phi < \phi_d \\ 0^\circ C & : \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$\chi = 1^\circ C(T_{S6}); \chi = 3^\circ C(T_{S7}, T_{S8});$ SST アノマリの最大値

$\lambda_0 = 0^\circ E; \lambda_d = 30^\circ; \phi_d = 15^\circ;$ 1KEQ, 3KEQ のアノマリの存在する経度

$\lambda_0 = 0^\circ E; \phi_d = 30^\circ;$ 3KW1 のアノマリの存在する経度

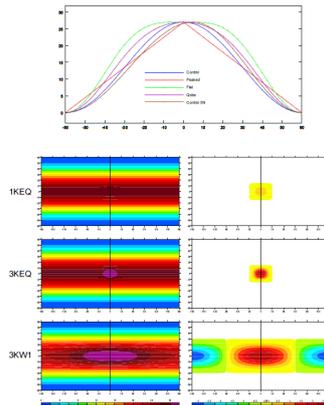


図 2.1: APE で規定された SST の分布. Control, Peaked, Flat, Qobs, Control-5N の緯度分布および, 1keq, 3keq, 3kw1 の水平分布 (左) および, それぞれから, Control を引いた結果 (右) を表している.(Neale and Hoskins,2000a)

基本となるのが, 赤道対称・東西一様分布の control である. この control を元に, 赤道対称でいくつか変化をつけたのが, flat, qobs, peaked の 4 種類である. それぞれの特徴は, 図 (2.1) の経度断面のグラフを参照してほしい. 次に, control を北側へ, 5° ずらし, 赤道対称性を損なわせたものが, control-5N である. 以上 5 つは全て, 東西一様であったが, control に対して, アノマリを作ったのが, 1keq, 3keq, 3kw1 である. 1keq, 3keq は, 赤道上の 1 点に各々, 1K, 3K のアノマリを置いたものである. 3kw1 は, 3keq に加えて, 経度方向に 180° ずれた場所に, -3K のアノマリを設定したものである. これら 8 種類の SST の計算結果を用いることで, SST に対する GCM の, 緯度変化に対する応答 (control, flat, peaked, qobs, control-5N), 経度変化に対する応答 (1keq, 3keq, 3kw1) を調べようとしている. 本論文では, 今後使用した SST 分布の名前で, 実験の種類を表すこととする.

日射に関しては, 全ての実験で赤道に対して対称であるが, 日変化は含めることになっており, 太陽定数は, $1365W/m^2$ と決まっている. また, 日射による強制の赤道対称性を維持するために, 離心率と赤道傾斜角をゼロとした, 地球軌道のパラメータに調整した軌道とする. そして, 放射輝度は暦に左右されないことになっている. 地球温暖化ガスは CO_2 を想定し, その濃度は 348 ppmv と定めている. オゾンの寄与も考慮し, その分布は帯状に対称な緯度-高度分布を持つ. また, この寄与も赤道対称である. 放射活性気体は, CH_4 :1650 ppmv, N_2O :306 ppmv とし, ハロカーボンの放射強制力は, $0.24 W/m^2$ とする. 放射に影響を与えるエアロゾルは考慮しない. 暦に関しては, 一年を 360 日もしくは 365 日として計算する. 大気質量に関しては, 初期の大気質量は, 表面気圧の全球平均に換算して, 101325 Pa となるように設定する. 積分時間は, 3.5 年とし, 最初の 6 ヶ月は, スピンアップ時間として, 解析するのは残りの 3 年分とする. 最後に, 物理定数, パラメータは表 (2.1) のとおりとする.

表 2.1: 規定された物理定数とパラメータ

地球の回転速度	$\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$
平均地球半径	$a = 6371.0 \text{ km}$
平均地表面重力	$g = 9.79764 \text{ m/s}^2$
乾燥大気の気体定数	$R_d = 287.04 \text{ J/kg K}$
乾燥大気の比熱容量	$C_{pd} = 1004.64 \text{ J/kg K} = 7R_d/2$
	$\kappa = R_d/C_{pd}$
水蒸気の気体定数	$R_v = 461.50 \text{ J/kg K}$
水蒸気の比熱容量	$C_{pv} = 1846.0 \text{ J/kg K}$
0°C での気化潜熱	$L_v = 2.501 \times 10^6 \text{ J/kg}$
0°C での融解潜熱	$L_i = 3.337 \times 10^5 \text{ J/kg}$
0°C での昇華潜熱	$L_i + L_v = 2.834 \times 10^6 \text{ J/kg}$

2.2 解析手法

次に今回行った解析について記す。解析手法は、基本的に WK1999 に準拠している。

解析は次のように行われた。

- 15N から 15S のデータを取り出し、対称成分/反対称成分に分離する。
- 30 日ずつずらしながら、90 日毎にデータを区切り、データセットを作成する。
- 各データに対して緯度毎にパワースペクトルを求め、それらを足し合わせる。
- 得られた 90 日 データのパワースペクトルを足し合わせる。
- 上記データに対して、波数、周波数方向各々に、1-2-1 で移動平均をかけることを、40 回繰り返し、バックグラウンドスペクトルを求める。
- 元のスペクトルとバックグラウンドスペクトルの比を計算する。

ある変数 A を緯度 ϕ の関数として表し、その対称成分を A_s 、反対称成分を A_a とすると、次のように表現できる。

$$A(\phi) = A_s(\phi) + A_a(\phi)$$

このため、以下のように計算することで、対称成分と反対称成分に分離することができる。

$$A_s(\phi) = (A(\phi) + A(-\phi))$$

$$A_a(\phi) = (A(\phi) - A(-\phi))$$

次に、解析データを 30 日ずつずらしながら、90 日で 1 セットのデータセットを作成し、各々のデータに対して、緯度ごとにパワースペクトルを求め、それら全てを足し合わせる。こうすることにより、15S - 15N で起こる現象の全てを見ることができ、かつそのままでは強く出てきて、他のシグナルを覆い隠してしまう季節変化の影響を取り除くことができる。こうして得られたスペクトルデータが、解析で用いるオリジナルのスペクトルデータとなる。

次に、1-2-1 の加重移動平均を上記オリジナルのスペクトルデータに対して、複数回行う。これにより、全ての周期的なシグナルを取り除くことができ、ランダムおよび非周期的なシグナルのみが残されることとなる。このスペクトルデータをバックグラウンドスペクトルと呼び、最終的にオリジナルのスペクトルデータと、このバックグラウンドスペクトルの比を取ることで、統計的に重要なシグナルのみが残ることとなる。

第3章 解析結果と考察

WK1999 は, NOAA の極軌道衛星の外向き長波放射 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) のデータを熱帯域の雲の分布の指標として用い, 第2章で解説した手法でこの OLR データをスペクトル解析することで, 熱帯域の対流活動について議論している. 本論文では, 各グループのスペクトル解析結果および, WK1999 の結果を相互に比較することにより, 各グループに共通する振る舞いや異なる振る舞い, 現実大気との違いについて議論する.

図(3.1)は, WK1999 で, 現実の熱帯大気の OLR データをスペクトル解析した結果である. 対称成分においては, ケルビン波の分散関係に沿って, 強いシグナルが現れている. また, 波数1から波数6, 周波数0.25の座標にスペクトルのピークが現れている. 反対称成分においては, 混合ロスビー重力波 (Mixed Rossby Gravity wave, MRG) の分散関係に沿って, 強いシグナルが現れている. また, 波数1, 周波数0.25の座標にスペクトルのピークが存在し, WK1999 では, これはマッデン-ジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation, MJO) のシグナルであると述べている. MJO は, Madden and Julian(1971, 1972) によって発見された, 30-60日の周期で東進する東西波数1の循環構造の振動であり, 熱帯大気に見られる組織化された降水構造である. 本論文では, これらの特徴と各グループのスペクトル解析結果を比較することで, 熱帯の現実大気と APE で設定された仮想環境から来るであろう結果の違いについて考察する.

図(3.2), 図(3.3)は, control 実験の対称成分の実験結果を示したものである. AGUforAPE, ECMWF, GFDL, K1JAPAN, MIT の以外のグループの結果では, WK1999 の結果と一致する, ケルビン波の分散関係に沿ったシグナルが強く現れているのがわかる. AGUforAPE, ECMWF, K1JAPAN, GFDL, MIT の結果では, ケルビン波に沿った強いはっきりとしたシグナルは見ることができないが, ケルビン波に沿ったスペクトルの分布そのものは現れている. MJO に関しては, CSIRO, ECMWF, GSFC, K1JAPAN で, 波数1周波数0.02付近のスペクトルピークが見て取れるが, その他のグループの結果では, WK1999 で言う MJO のスペクトルピークは見ることができなかった. 以上から, control 実験においては共通する振る舞いとして, ケルビン波が現れると言えそうである.

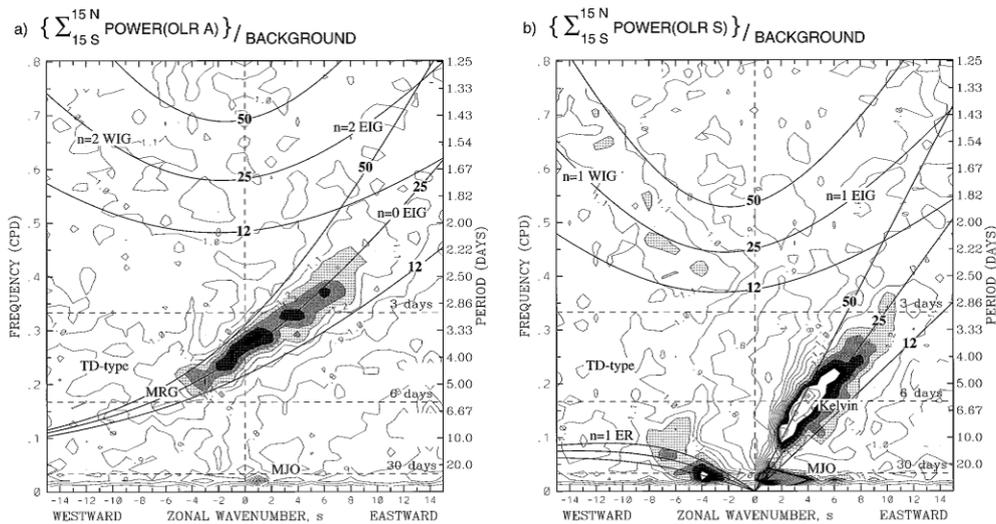


図 3.1: 熱帯域 (15S-15N) の OLR のスペクトル解析結果. a) 反対称成分, b) 対称成分である. 横軸が波数, 縦軸が周波数である.(Wheeler and Kiladis, 1999)

次に示す図 (3.4), 図 (3.5) は flat 実験の結果である. この実験では control とは逆に, 全てのモデルに共通してケルビン波の構造が見られなかった. control と flat は図 (2.1) からわかるとおり, 東西一様分布であることが共通しており, 赤道を中心とした緯度方向の分布が異なっている. flat は, 今回行った解析の範囲 (15S-15N) でみると, ほぼ緯度方向にも一様であるとみなせることができる. このことからケルビン波には, SST 分布の緯度方向の傾きが重要であることが考えられる.

次に, 反対称成分の結果である. 図 (3.6), 図 (3.7) は, control 実験の実験結果を示したものである. 共通して波数-1, 周波数 0.02 付近にスペクトルピークが現れている点と, WK1999 では強く現れていた MRG のシグナルが全く見られないという結果が共通している.

この結果に対する考察を行う. まず最初に考えるのが, APE の実験設定の対称性である. この図 (3.6),(3.7) の結果は, SST 分布に赤道対称な control 分布のもとに行われた計算である. また, 本論文には載せていないが, 赤道対称な分布を持つ flat, peaked, qobs においても同様に, MRG のシグナルが現れない結果となっている. 従ってこの SST の対称性から, 反対称成分において MRG のシグナルが現れないのではないかと考えることができる. この推論を検証するため, APE で規定されている SST 分布の中で赤道対称ではない control-5N の計算結果に対して, スペクトル解析を行ったのが, 図 (3.8),(3.9) である. FRCGC, UKMO に関しては, control-5N の SST 分布を使用した計算結果が存在しないので, これら 2 グループ以外の計 12 個の結果を載せている. 図から分かるとおり, 赤道対称ではない control-5N の SST 分布を使用した計算においても, 共通して MRG のシグナル

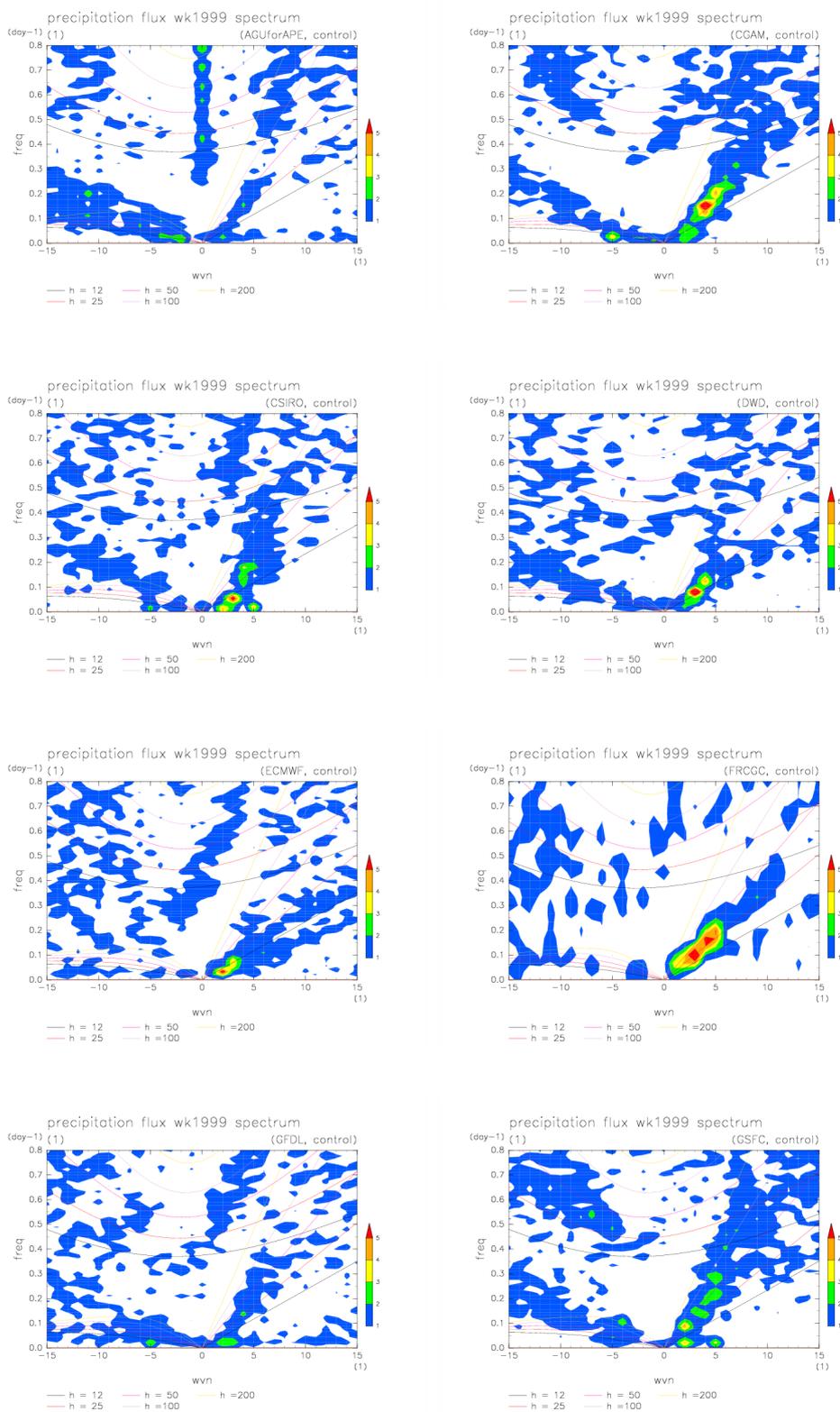


図 3.2: control 実験の対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に, AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, FRCGC, GFDL, GSFC の結果である.

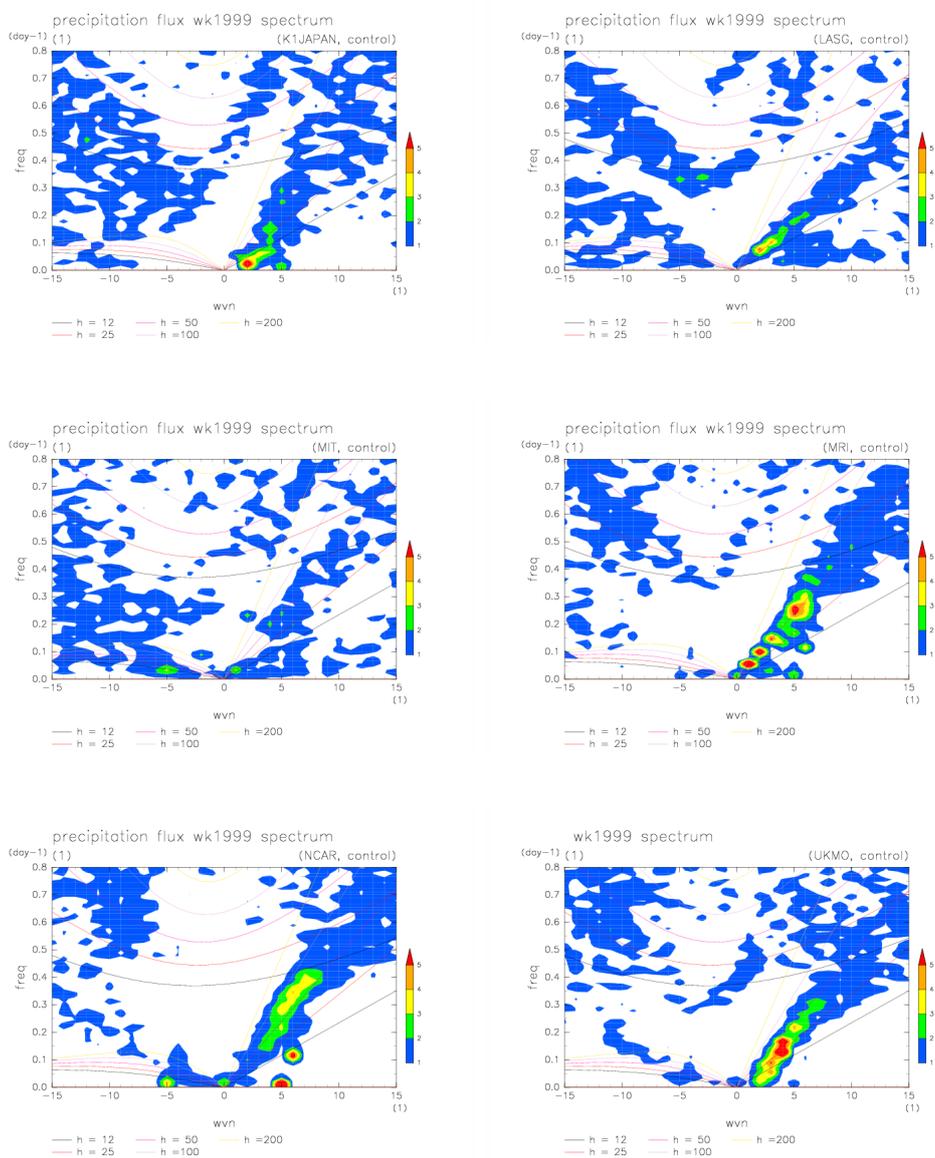


図 3.3: control 実験の対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO の結果である.

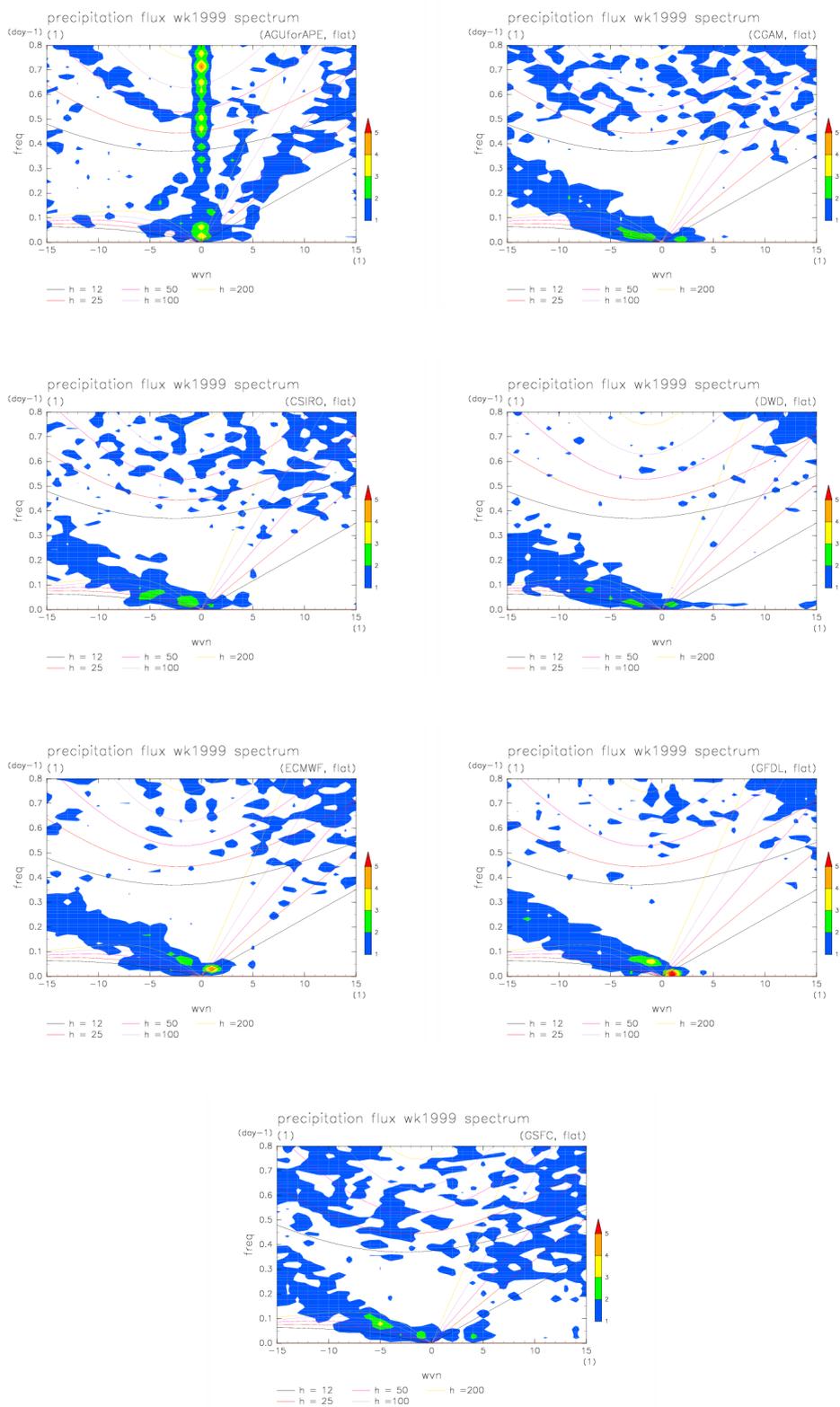


図 3.4: flat 実験の対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に, AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, GFDL, GSFC の結果である.

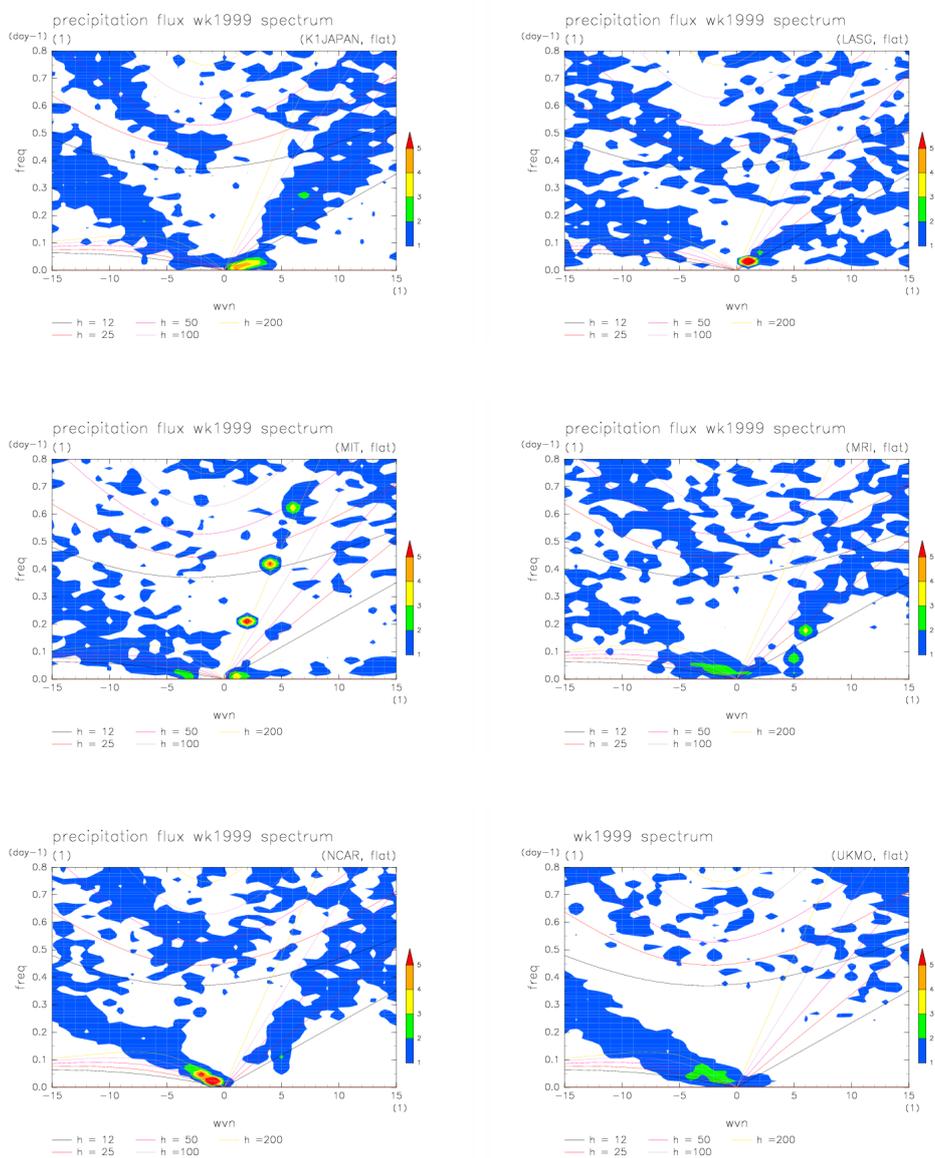


図 3.5: flat 実験の対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO の結果である.

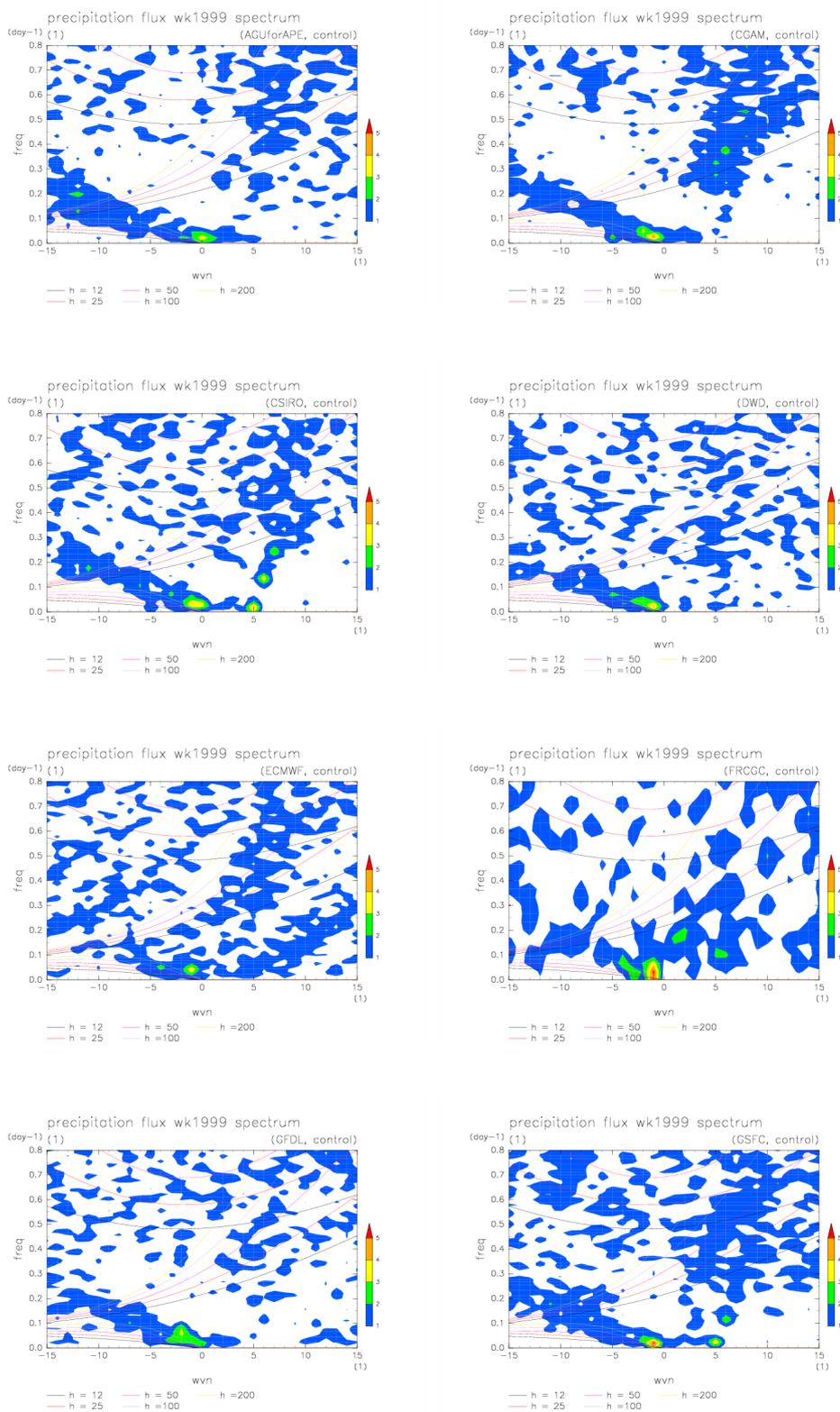


図 3.6: control 実験の反対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に, AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, FRCGC, GFDL, GSFC の結果である.

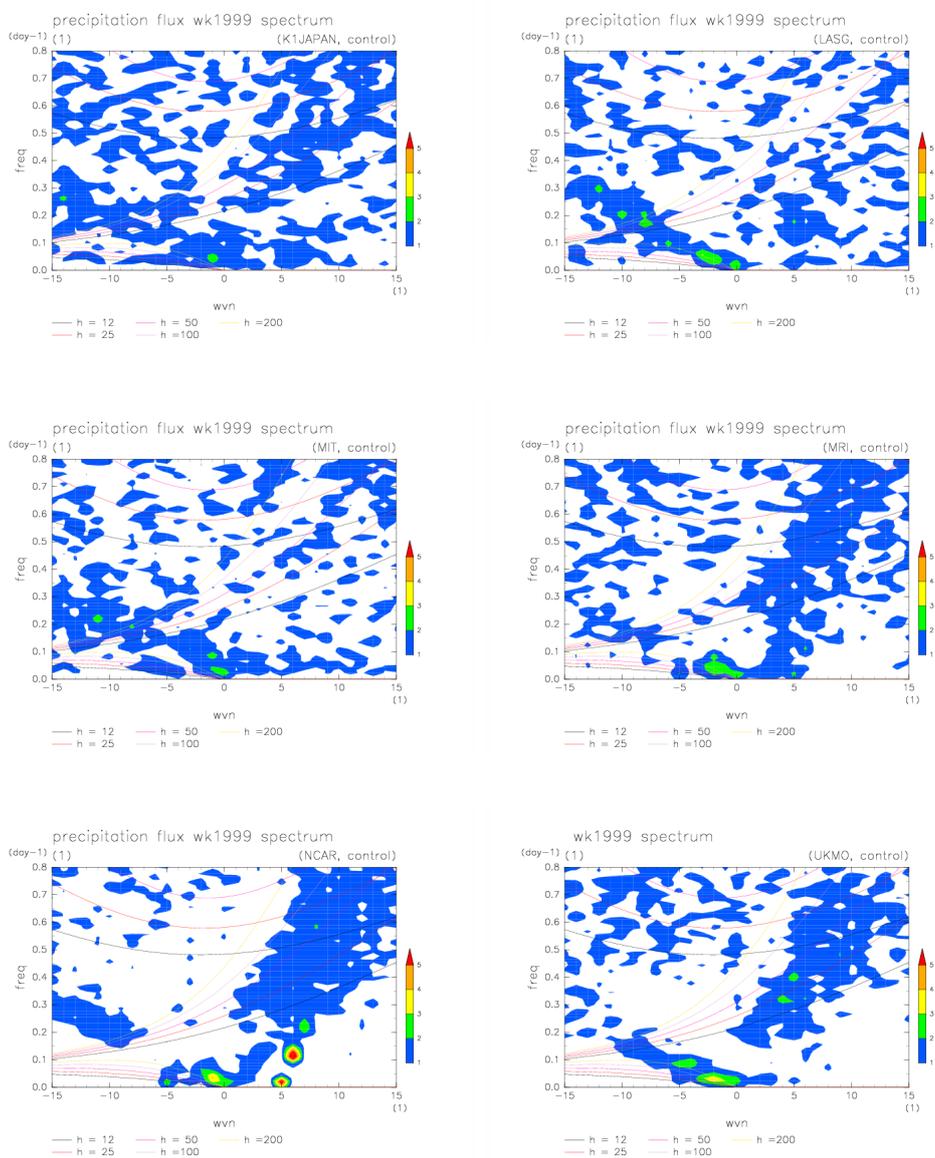


図 3.7: control 実験の反対称成分のスペクトル解析の結果。左上から順番に K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR, UKMO の結果である。

が現れない結果となった。また赤道上にアノマリを置く, 1keq, 3keq, 3kw1 の実験においても同様に, ERG のシグナルは見ることができなかった。

対称成分の結果から各 GCM の結果は, SST の分布に対して強い影響を受けることが判っている。また, 現実の熱帯大気の観測データの解析では, 図 (3.1) を見ればわかるとおり, はっきりと ERG のシグナルが見て取れる。にもかかわらず, 反対称成分に関しては 8 種類全ての SST 実験で共通して ERG のシグナルが現れなかったことから, APE の実験設定下では ERG を駆動するのに必要不可欠なパーツが何を欠いているという結論となる。

APE の理想化された実験設定と現実大気では, 数多くの違いが存在するため, 今回の結果のみでは ERG を生み出す原因を特定することは残念ながらできないが, 異なる GCM, 異なる SST 実験の全てで共通して, ERG のシグナルが見えないというのは, とても興味深い結果である。

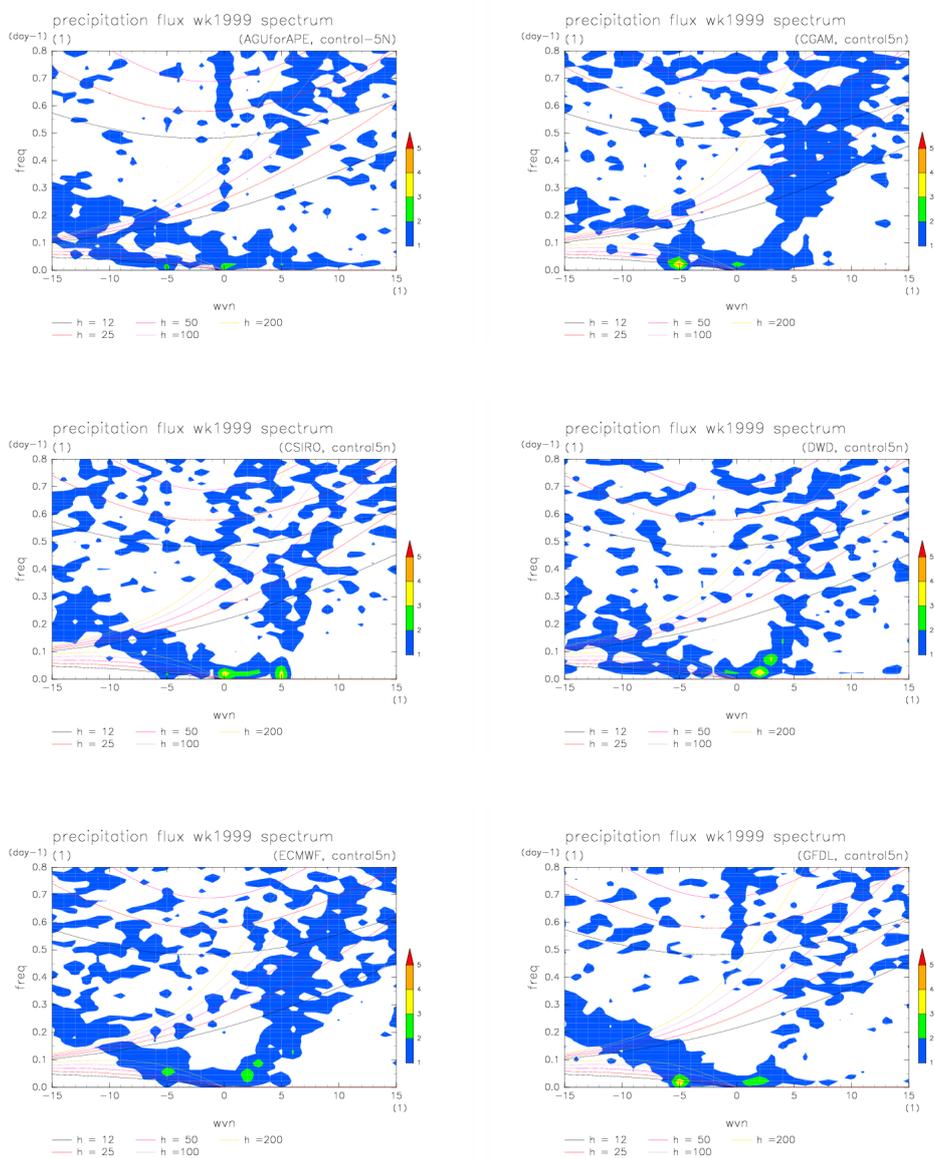


図 3.8: Control-5N 実験の反対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に, AGUforAPE, CGAM, CSIRO, DWD, ECMWF, GFDL の結果である.

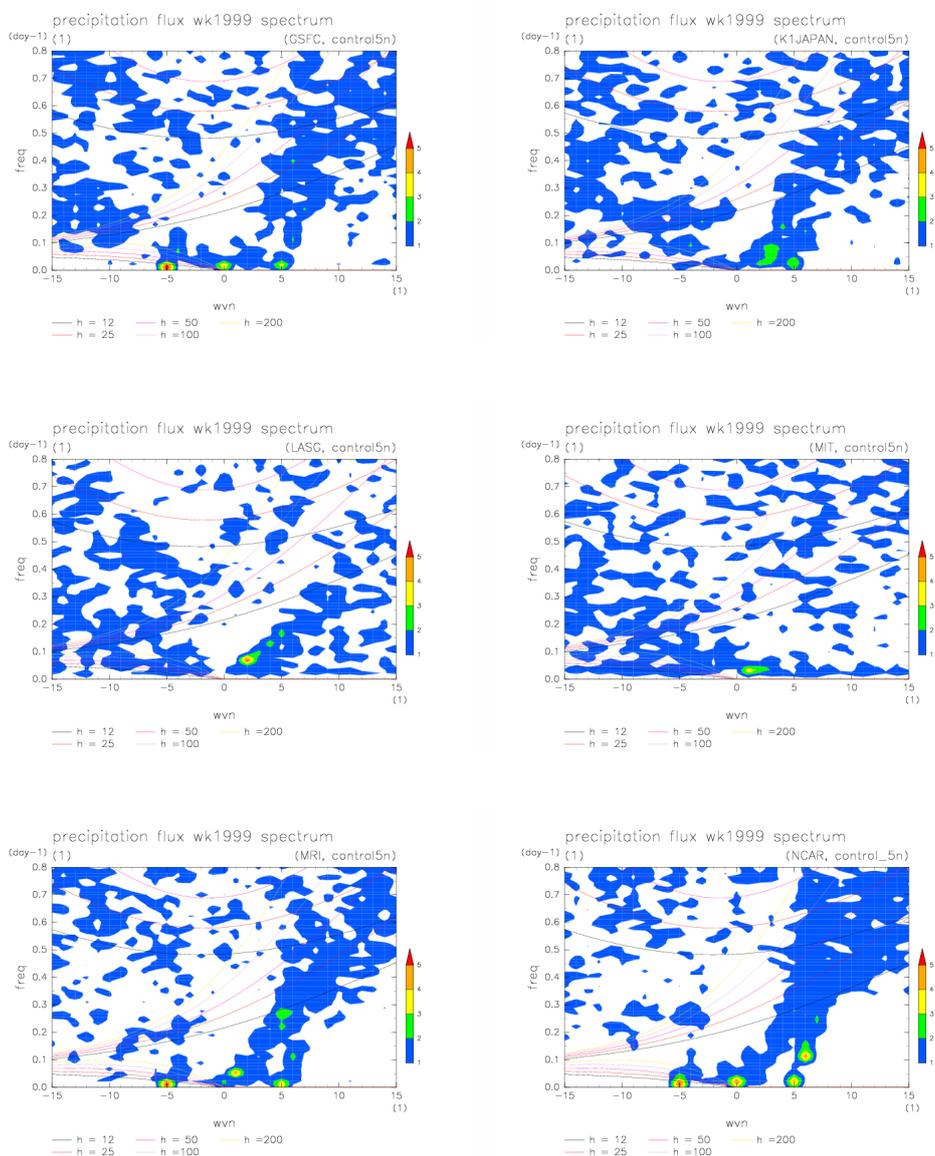


図 3.9: Control-5N 実験の反対称成分のスペクトル解析の結果. 左上から順番に GSFC, K1JAPAN, LASG, MIT, MRI, NCAR の結果である.

第4章 結論

APE の各グループの実験結果に対して、WK1999 でなされた解析を行い、APE の計算結果に共通するふるまいと、WK1999 の解析結果の比較を行った。

WK1999 では、現実大気の観測データに対して同じ解析を行い、同一のものと思われていた、ケルビン波と MJO は本当は、異なる現象であり、このような解析を行うことで、分離できることを示した。また、反対称成分に関して、混合ロスビー重力波のシグナルが現れることも示している。

各グループの結果をまとめてみたところ、対称成分に関して、今回の APE 各グループの結果では、AGUforAPE や ECMWF, GFDL, K1JAPAN, MIT のグループの結果のように、強く現れていないものもあるが、全てのグループでケルビン波の分散関係に沿ったシグナルが現れていることが確認された。次に MJO のシグナルに関しては、AGUforAPE, CGAM, CSIRO, ECMWF, GFDL, GSFC, K1JAPAN, MIT の結果に関しては、それらしき分布が見て取れることができたが、APE の全グループで見られることはなかった。

反対称成分に関しては、全ての GCM の全ての SST 実験において、ERG のシグナルは確認できなかった。赤道対称な control, flat, peaked などのみならず、赤道対称でない control-5N 実験でも同様の結果となっていることから、少なくとも SST 分布の対称性が原因というわけではないという結論になった。

使用する物理過程やパラメータの値の違いで、モデルのふるまいが大きく変わるのとは前述のとおりなので、各グループの違う設定の中で、きれいに共通して、ERG が現れないことから SST 分布以外の APE の計算設定の中に、ERG に必要不可欠なパーツを除く、もしくは妨げているものが存在することが考えられる。考えられる可能性は多岐にわたるため、今回の結果のみではその原因を追及することはできなかったが、この反対称成分のふるまいは、注目に値するものである。

謝辞

本論文の作成にあたって、多くの方々に協力いただいた。論文のテーマと一緒に考えてくださった指導教官の林 祥介 教授、内容に関して多くの助言をいただいた九州大学の中島 健介 助教に深く感謝申し上げます。また、論文の理論的側面および技術的側面において様々な助言をしていただいた、岩山 隆寛 準教授や、地球および惑星大気科学研究室の村上真也氏、納多 哲史氏をはじめ多くの皆さまに、簡単であるがここに感謝の意を述べる。

本文中の図の作成には、gphys などの電脳 Ruby プロジェクトの成果物を利用させていただきました。ここに開発者の方々に感謝する。

参考文献

Hayashi, Y.-Y., and Sumi, A., 1986: The 30-40 day oscillations simulated in an "aqua planet" model., *J.Meteor.Soc.Japan*, **64**, 451-467

Madden, R. A., and Julian, P. R.,1971: Detection of a 40-50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropic Pacific., *J.Atmos.Sci.* **28**, 702-708
Madden, R. A. and Julian, P. R.,1972: Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period, *J.Atmos.Sci.* **29**, 1109-1123

Neale, R. B. and Hoskins, B. J., 2000a:A standard test for AGCMs including their physical parametrizations: I: The proposal., *Atmos.Sci.Lett.*, **1**,101-107

Neale, R. B. and Hoskins, B. J., 2000b:A standard test for AGCMs including their physical parametrizations: II : results for the Met Office Model., *Atmos.Sci.Lett.*, **1**,108-114

Wheeler, M. and Kiladis, G. N., 1999: Convectively Coupled Equatorial Waves: Analysis of Clouds and Temperature in the Wavenumber-Frequency Domain., *J.Atmos.Sci.*, **56**,374-399