

MIS021-01

会場:202

時間:5月22日 09:00-09:15

上空の渦によるポーラー・ローの発生・発達

Generation and development of a polar low under the influence of a vortex aloft

伊藤 淳二¹, 伊賀 啓太^{1*}

Junji Ito¹, Keita Iga^{1*}

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ AORI, The Univ. of Tokyo

冬季の高緯度地方の海洋上では寒気内に数百 km スケールのポーラー・ローと呼ばれる低気圧が発達することがある。いくつか考えられているポーラー・ローの発生・発達にはいくつかのメカニズムの中で上層の渦の影響を理想化された設定で再現することによって調べる。

上層の渦の影響に着目したこれまでの研究では、初期条件として上層の渦と下層擾乱を与えており、地表面付近の低気圧の発達において、下層の擾乱が上層の渦の前方にあるという位置関係が重要であることが示されている。しかし、下層擾乱は上層渦の影響によって励起することが可能である。そこで、本研究では、上層渦のみの影響によって下層の擾乱を励起し、そこからポーラー・ローが発達するかどうかを調べた。非静力学モデルにより時間積分を行った結果、初期条件としては与えていない下層の擾乱が発生し、それがコンマ型のポーラー・ローとして発達した。

この上層渦の影響で下層の渦が発生する際のメカニズムの詳細について調べた。上層の渦が地上付近に擾乱を励起する仕組みとしてよく行われるふたつの説明がある。ひとつは、上層渦の前方に生ずる上昇流に伴って下層渦が励起されるというもの、もうひとつは、地表面の温位偏差の移流に伴って下層の渦が励起されるというもので、後者の場合は、しばしば下層の傾圧性が重要とされる。低気圧の発生過程では湿潤過程の影響は小さいと考えられたため、水蒸気をなくしたドライ実験を行い、下層の渦の発生過程を調べた結果、下層擾乱の上方では対応する上昇流が生じており、下層渦は上層渦に伴う上昇流によるストレッチングを受けて励起されたと考えられた。渦は南方に変位しており、傾圧性のある地表面付近での温位移流に伴って下層渦が励起されるというメカニズムはあまり働いていないことが示された。

下層渦の南北変位に関する考察を行った。本実験の結果では、ポーラー・ローは東進するとともに多くの時間帯で南に変位したが、最終段階でやや北に変位した。この成熟期に北へ変位するメカニズムを調べたところ、凝結を伴う対流による過度の生成によって低気圧の位相が北に変位していることが示された。一方、初期の渦の南進については、上層の渦が下層に擾乱を励起する際にその後方に高気圧が形成され、低気圧がこの高気圧と渦対をなすことによって南に変位していると理解できる。

キーワード: ポーラー・ロー, 上空の渦, 傾圧性, コンマ型雲

Keywords: polar low, vortex aloft, baroclinicity, comma-shaped cloud

2010年1月13日に新潟県に暴風雪をもたらしたメソスケール擾乱の事例解析 A case study on the meso-scale disturbances causing the severe snowstorm in Niigata Prefecture on 13 January 2010

荒木 健太郎^{1*}, 猪上 華子², 林 修吾², 中井 専入³
Kentaro Araki^{1*}, Hanako Inoue², Syugo Hayashi², Sento Nakai³

¹ 銚子地方気象台, ² 気象研究所, ³ 雪氷防災研究センター

¹Choshi Local Meteorological Observatory, ²Meteorological Research Institute, ³Snow and Ice Research Center

冬季北陸地方の平野部での豪雪・突風の要因のひとつとして、日本海上で発生・発達するメソスケールの渦状擾乱が知られている(山岸ほか, 1992)。この渦状擾乱は、ユーラシア大陸から寒気が日本海に吹き出した時に形成される日本海寒帯気団収束帯(JPCZ, Asai 1988)上で発生し、メソアルファスケールやメソベータスケールなどの異なる規模の擾乱(以下、それぞれMASD, MBSD)に発達することがある。これらの渦状擾乱の発生・発達機構や内部構造の理解は防災上の観点から非常に重要である。

本研究では、2010年1月13日に北陸地方に接近したMBSDについて事例解析を行い、発達機構と三次元的な構造を調べた。気象庁アメダスの佐渡市相川では13日8時7分(以下、時刻はJST)に前10分平均最大風速30.4m/s、7時45分に最大瞬間風速40.0m/sを観測し、新潟県では暴風雪による停電や交通事故が相次いだ。気象庁全国合成レーダーを用いると、13日0時から12時までに5個のMBSDを確認でき、先行して北陸地方に接近したふたつのMBSDは東北東進し、他は南東進した。暴風雪は南東進した2つのMBSDに伴うものであると推測される。また、それらのMBSD中心の東側では周辺のアメダス観測点に比べて3~4K温かい領域があり、これはMBSDのWarm Coreと思われる。

MBSDの構造について議論するため、気象庁非静力学モデル(JMANHM)を用いて再現実験を行った。初期値・境界値には水平分解能20kmの気象庁全球解析と気象庁全球モデルの予想結果を用い、水平分解能20km(20km-NHM)、水平分解能5km(5km-NHM)、水平分解能2kmのNHM(2km-NHM)の順に単方向にネスティングして実行した。湿潤過程としては、氷相を含むバルク法の雲物理過程を用い、20km-NHMではKain-Fritschスキームの対流パラメタリゼーションを併用した。

実験の結果、5km-NHMと2km-NHMともに東北東進するMBSDや暴風雪をもたらしたMBSDに対応していると思われる擾乱を再現していた。暴風雪をもたらしたMBSDについては、再現された降雪粒子はスパイラル状に分布しており、レーダー観測で得られた擾乱の水平スケールよりも規模が大きかった。進路は実況よりもやや南を指向し、新潟県に上陸するタイミングも約2時間早かった。しかし、再現されたMBSD付近の風速や気圧低下、Warm Coreの存在は観測事実と一致することから、概ね再現に成功していると考えられる。

ここで、Warm Coreの存在は、過去の研究においても報告されており(Ninomiya et al. 1990; 大久保 1995)、その形成には南岸低気圧の循環に伴う高相当温位気塊の移流、凝結に伴う非断熱加熱、下降流に伴う断熱昇温が重要であると指摘されている(村上ほか 2005)。再現されたWarm Coreの成因を調べるために後方流跡線解析を行った結果、南岸低気圧からの高相当温位気塊の移流がないことがわかった。また、Warm Coreに対応する明瞭な下降流は見られず、反射強度が強く顕著な上昇流を持った降雪雲にWarm Coreは対応していた。非断熱加熱のMBSD発達過程への影響を調べるために、ドライモデルで感度実験を行った。その結果、南東進するMBSDは再現されたが、Warm Coreの形成や擾乱に伴う風速の強まりは見られなかった。さらに、感度実験の初期場からWarm Coreの構造を持っていた東北東進するMBSDは、その構造を維持したまま新潟県の海上で停滞し、南東進するMBSDがそのWarm Coreに接近して風速の強まりがみられた。これにより、本事例での暴風雪をもたらしたMBSDが持つWarm Coreの形成要因には凝結に伴う非断熱加熱が重要であることがわかり、MBSDの発達には非断熱加熱が大きな役割を果たしている可能性が示唆される。また、上層寒気トラフに対応する高渦位域の垂れ下りが確認でき、MBSDはその真下に位置していた。MBSDの発達に上層擾乱が関連している可能性も示唆される。

キーワード: 渦状擾乱, 非静力学モデル

Keywords: vortical disturbances, NHM

MIS021-03

会場:202

時間:5月22日 09:30-09:45

雷鳴スペクトルの時間変化における大気吸収の影響 Influence of atmospheric absorption on time change of thunder spectrum

光永 誠^{1*}, 酒井 敏²

Makoto Mitsunaga^{1*}, Satoshi Sakai²

¹ 九大・芸術工, ² 京大・人環

¹Design, Kyushu Univ., ²Human and Environ, Kyoto Univ.

雷放電は自然界で起きる大規模な火花放電である。雷放電には雷鳴と呼ばれる音波が伴う。静電気による放電など、身近に観測できる短い距離の火花放電に伴う音波はパルス的で高い周波数まで含む。これに対し雷鳴は高い周波数成分が減衰しており、低い周波数成分が強い。このことは雷鳴における低音化現象として議論の対象になってきた。低音化現象の原因としては、雷鳴が大気中で受ける吸収減衰の影響や、雷放電路のような広がりのある音源の形による音波の干渉の影響が考えられている。しかしこれらについての定量的な理解は不十分である。

本研究では雷鳴を観測し、その音圧振幅スペクトルの周波数特性の時間変化を調べた。ここで、ある時間におけるスペクトルはその時間を中心としたおよそ0.5秒分を解析したものであるとする。このような解析を一回の雷鳴全体にわたって行い、その時間変化を求めた。その結果、ある雷鳴において、スペクトルの傾きが1秒あたりおよそ0.002dB/Hzの割合で急になり、周波数が高い成分から減衰していくことが分かった。

一方で雷鳴を電放電路上の各点から発生する音波の重ね合わせとして計算を行った。この時、雷放電路を単純な直線音源として近似した。またこの直線音源上の各点からはパルス音が発生するとした。各々のパルス音は大気吸収の影響を受けて、周波数に依存した減衰をする。大気吸収の計算には標準大気モデルを用いた。遠い音源からの音はより遅く到達し、より多くの減衰を受けるので、時間と共に減衰量は大きくなっていく。計算の結果、スペクトルの傾きがおよそ1秒あたりおよそ0.002dB/Hzの割合で急になり、観測結果とほぼ一致した。

以上から雷鳴の低音化現象における大気吸収の影響を定量的に示すことができた。

キーワード: 雷鳴, 大気吸収, 雷放電路

Keywords: thunder, atmospheric absorption, lightning channel

MIS021-04

会場:202

時間:5月22日 09:45-10:00

大気は地面から冷えるのか Is the atmosphere cooled by the ground?

中村 美紀^{1*}, 善福 章², 荒井 裕¹, 増田 仙一¹, 古屋 姫美愛³, 酒井 敏¹

Miki Nakamura^{1*}, Akira Zenpuku², Hiroshi Arai¹, Sen-ichi Masuda¹, Kimie Furuya³, Satoshi Sakai¹

¹ 京都大学大学院人間・環境学研究科, ² 京都大学総合人間学部, ³ 京都大学理学部

¹Human and Environ, Kyoto Univ., ²Integrated Human Studies, Kyoto Univ., ³Faculty of science, Kyoto Univ.

現在、大気は地面に冷やされるという説が主流となっている。筆者らはこれまで、気温や地表面温度等の観測を行ってきたが、1日中地面の温度が気温より高い状況は、日常的に起こっている。それでは気温はどのようにして、地面よりも低い温度となりうるのであろうか。

その実態を把握するため、2010年4月から1年間、京都市左京区内にて観測を行った。観測地点は、比叡山頂(標高約850m)、比叡山標高約550m地点、比叡平(標高約370m)、上高野(標高約100m)、京都大学内(標高約50m)の5地点である。今回の観測内容は気温のみとし、サーミスタ温度計を用いて、1秒サンプリングを行ったものを、データロガーに2分平均値にして記録を行っている。解析では、天候による影響をできるだけ排除するため、京都地方気象台の昼間の天気概要から、晴天日を抽出し、各月ごとに時間平均を行った。

その結果、年間を通して、同様の成層過程が確認された。午後2時から3時にかけて全高度の最高温位が同じになることはこれまでの概念通りであるが、その後、標高850mである山頂を含む全地点共に温位は低くなっていき、次第に高度が高いほうから順に、温位は一定となっていく。すなわち、上空から成層していく。この結果は概念とは異なり、もし大気は地面から冷やされるのであれば、当然、標高の低いところから成層していく過程が見えるはずである。実は、対流のみの概念ではなく、放射平衡の概念で考えると、大気は上空から成層するのではないだろうか。本発表では、これらの観測結果を通して、大気の冷却過程の実態について報告する。

キーワード: 大気境界層, 成層過程, 冷却, 放射

Keywords: atmospheric boundary layer, bedding process, cooling, radiation

MIS021-05

会場:202

時間:5月22日 10:00-10:15

バルク交換係数 Ch について For the bulk exchange coefficient Ch

古屋 姫美愛^{1*}, 増田 仙一², 中村 美紀², 酒井 敏²
Kimie Furuya^{1*}, Sen-ichi Masuda², Miki Nakamura², Satoshi Sakai²

¹ 京都大学理学部, ² 京都大学大学院人間環境学研究所

¹Faculty of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Human and Environment

バルク法は大気境界層の運動量、顕熱、潜熱輸送量を計算するためによく使われ、乱流拡散による空気の熱交換を前提としている。しかし本研究では地表面から 0.5cm より上の高さでは対流によりほぼ一様な温度分布となっていること、地表面付近では乱流拡散が及ばない熱境界層が存在することが分かったため、大気境界層内の温度分布と熱収支を計算するには乱流拡散を仮定したバルク法を用いることが出来ないと結論した。しかし異なる温度の空気塊が上下に交換される割合を表し、バルク式に含まれるバルク交換係数 Ch を地表面付近の 0.5cm の熱境界層を通し熱伝導によって顕熱が輸送されたとして計算してみたところ、乱流拡散を前提としたバルク交換係数の推定値とほとんど変わらなかった。よってバルク交換係数は乱流拡散ではなく熱伝導による熱輸送の割合を表すと認識した方が良いことが示唆された。

キーワード: バルク式, 境界層, 顕熱

Keywords: bulk formulation, boundary layer, sensible heat

MIS021-06

会場:202

時間:5月22日 10:15-10:30

フラクタル構造体の風力特性 Wind stress of fractal structure

荒井 裕^{1*}, 中村 美紀¹, 古屋 姫美愛², 酒井 敏¹
Hiroshi Arai^{1*}, Miki Nakamura¹, Kimie Furuya², Satoshi Sakai¹

¹ 京都大学大学院人間環境学研究科, ² 京都大学理学部
¹Human and Environ, Kyoto Univ., ²Faculty of Science, Kyoto Univ.

フラクタルという概念は、マンデルブロによって1975年に提唱された。これは今まであいまいで記述できなかった、自然界の多くの物体・現象を、フラクタル次元という新たな次元で記述する事に成功した。しかし、これまでの研究では、様々な物体や現象のフラクタル次元は求められてきたものの、物理現象中のフラクタルが示す性質に関してはほとんど研究されてこなかった。その一つがフラクタル周りの流れの研究である。本研究では、フラクタル構造体もつあいまいさに着目し、そのあいまいさが示す特性を風洞実験という実験的立場から、可視化風洞実験ならびに空気抵抗測定実験によって検証した。具体的には、風洞実験装置を作製し、そこにフラクタル、ランダム、市松模様で平面分布させたスクリーンを入れ、煙をトレーサとした可視化実験による流れの直接の観察、各分布前後の圧力差を直接測定しそれにより各試料の空気抵抗を求めた。その結果、風洞内における煙の拡散の幅はあまり変わらなかったが、フラクタルが受ける空気抵抗は最も小さく、次いでランダム、市松模様という順に大きな値を示した。これは、フラクタルの場合は、他に比べ大きな渦が生成されやすく、それ故渦生成に伴うエネルギー損失が小さいからだと考えられる。結局、流れにおいて最も効果的な分布は、規則的な分布である市松模様ではなく、不規則な分布であるランダムでもなく、最もあいまいな分布であるフラクタルであると言える。つまり、あいまいさをもつフラクタルが最も風を通しやすい構造をしているのである。

キーワード: フラクタル, 風力特性
Keywords: fractal, wind stress

MIS021-07

会場:202

時間:5月22日 10:45-11:00

大気大循環構造の惑星パラメタ依存性 地球的条件から火星の条件まで Dependence of the characteristics of an atmospheric general circulation on the planetary parameters from Earth to Mars

高橋 芳幸^{1*}, 林 祥介¹, 石渡 正樹², 中島 健介³, 森川 靖大⁴, 小高 正嗣²

Yoshiyuki O. Takahashi^{1*}, Yoshi-Yuki Hayashi¹, Masaki Ishiwatari², Kensuke Nakajima³, Yasuhiro MORIKAWA⁴, Masatsugu Odaka²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 北海道大学大学院理学研究院, ³ 九州大学大学院理学研究院, ⁴ 情報通信研究機構

¹Kobe University, ²Hokkaido University, ³Kyushu University, ⁴NICT

We have been developing an atmospheric general circulation model (GCM) aiming at investigating general circulation of planetary atmospheres, such as the Mars, the Earth, the Venus, and ideal planets which may have some characteristics of exoplanets. Purposes of the model development are to enable us to investigate, with a common dynamical framework, possible varieties of general circulations of planetary atmospheres, and to understand underlying mechanisms that realize the varieties of circulations to extend our knowledge on planetary atmospheres. In the followings, the model which is being developed is described, and some preliminary results of experiments for the Earth- and Mars-like planetary atmospheres are presented.

An atmospheric GCM, dcpam (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/index.htm.en>), is developed with the basis of the Geophysical Fluid Dynamics (GFD) Dennou Club atmospheric GCM (<http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5/index.htm.en>). Dynamical core of dcpam solves the primitive equation system by using spectral transform method with the finite difference method in vertical direction. The included physical processes are the radiative, the turbulent mixing, and the surface processes. Further, simple condensation scheme of CO₂, which does not consider mass change due to condensation, is included for Mars experiment. The radiation models currently implemented in the model are those for Mars' and the Earth's atmospheres. The radiation model for grey atmosphere is also prepared for experiments for ideal planets. In addition, the simple forcing for the dynamical core test of Held and Suarez (1994) and for an experiment of Venus-like atmosphere following Yamamoto and Takahashi (2003) are also implemented.

By the use of this model, several experiments have been performed. In the followings, preliminary results of sequential experiments from an Earth-like to a Mars-like planet are presented. Following six sequential experiments are performed: (I) the Earth experiment, in which Earth's topography and land-ocean contrast are used and planetary radius and length of day in a year are Earth's values, (II) same as (I) but without orographic variation, (III) same as (II) but without ozone heating, (IV) same as (III) but without water/moist processes in the system, (V) same as (IV) but with planetary radius of Mars' value, and (VI) same as (V) but with length of days in a year of Mars' value (669 days). In the experiments (I)-(III), the Earth's land-ocean distribution is used and the climatological sea surface temperature is prescribed on the ocean grid point. Those experiments are performed with the horizontal resolution of T42 and 16 vertical levels. The horizontal resolution of T42 is equivalent to about 2.8 degrees longitude-latitude grid. Under these conditions, the model is integrated for 20 years from an initial condition of isothermal atmosphere at rest. The result during last 10 years is analyzed.

In this study, we focus on the structure of Hadley circulation at solstitial seasons when the structure is asymmetric with respect to the equator. The results show that one of the most important differences in Hadley circulation is caused by existence or absence of water in the system, as expected. It affects intensity and vertical extent of Hadley circulation significantly. This is qualitatively interpreted by the difference in moist and dry adiabatic lapse rate, if the surface temperature does not change significantly. In addition, the difference in planetary radius appears to have some influence on the latitudinal width of Hadley circulation. An additional experiment with quarter of Earth's radius shows that the latitudinal width of Hadley circulation is larger than that in the experiment with Mars' radius. In the presentation, these features will be discussed with showing results of additional experiments.

キーワード: 惑星大気, 火星, 地球, 大気大循環モデル

Keywords: planetary atmosphere, Mars, Earth, general circulation model

MIS021-08

会場:202

時間:5月22日 11:00-11:15

大気ブロッキングの持続に関する eddy フィードバックメカニズムについて An eddy-feedback mechanism for the maintenance of atmospheric blocking

山崎 哲^{1*}

Akira Yamazaki^{1*}

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

¹Earth & Planetary Sciences, Kyushu Univ.

大気ブロッキングは、中緯度偏西風帯に存在する北/南に高/低気圧の双極子型をした停滞性の孤立渦であり、再帰性・持続性を特徴として持っている。準地衡系ベータ面チャンネルモデルなどの比較的簡易なモデルで再現されるにも関わらず、未だにその力学的メカニズムが簡潔に理解されていない現象であり、地球流体力学的観点から解明すべき点が多い現象である。

ブロッキングの注目すべき特徴であるその持続性に関して、移動性擾乱 (eddy) とブロッキングとの間で相互作用が起こり、そこにフィードバック系が作られるということが Green (1977) 以降盛んに研究された。これを、以下では eddy フィードバックメカニズムと呼ぶ。そのような研究の中でも、特に Shutts (1983) は、理論的解析と数値実験によって eddy フィードバックメカニズムに関して本質的な議論を行ない、Eddy Straining Mechanism (以下 ESM) を提唱した。これは、eddy が、ブロッキングにぶつかって南北に引き伸ばされることによりブロッキング北/南側に負/正の渦度強制を与えることで、その強制が、ブロッキングの双極子構造を強化 (摩擦などの散逸に対して維持) し、ブロッキングの持続性が強化されるというメカニズムである。しかしながら、最近のいくつかの研究によって、ESM が有効に働くためには、eddy あるいは eddy の集団的特徴であるストームトラックが、ある特定の条件を満たさなければならないということが報告されており、その条件は、現実場でのブロッキング持続期において満たされにくい条件である。そこで、新たなメカニズム、つまり、より現実場に適用可能な eddy フィードバックメカニズムを提案・考察する。

このメカニズムは大きく2つの考え方に基づいている。1つは、保存量である渦位 (PV) の補給メカニズム、もう1つは、渦と渦の相互作用メカニズムである。特にこの渦と渦の相互作用メカニズムは、同極性の渦が、同極性を渦を引き寄せ吸収し逆極性の渦を引き離す相互作用を PV を用いて定量化したメカニズムであり、「Fujiwhara 効果」・「ベータドリフト」と本質的には同様のメカニズムである。このメカニズムでは、ブロッキング高/低気圧が、高/低気圧性 eddy を選択的・能動的に引き寄せ吸収することでその持続性を強化するという eddy フィードバックが働くことになる。このメカニズムの核心は、渦と渦の相互作用であり、ESM と本質的に異なるメカニズムである。数学的議論からも、ESM と今回のメカニズムの違いを明白にすることができる (Yamazaki and Itoh 2009)。今回の研究では、我々の提唱するメカニズムを実証するために、いくつか条件を変化させて数値実験を行う。

Shutts (1983) と同様な等価順圧準地衡 PV 方程式モデルを用いて、我々のメカニズムの有効性を調査した。このメカニズムでは、ストームトラックの大きな変動に対しても eddy フィードバック系を作ることができると思像されるので、ストームトラック (eddy) の強さや位置を変えてブロッキングの持続性がどのように変化するかを評価した。実験設定として、モデル領域の中心にブロッキング流としてのモドン解を置いた。実験は以下の3つの条件で比較された、i) ストームトラックがない実験、ii) ブロッキング中心緯度 (モデルの中心緯度) にストームトラックを置く実験、iii) ストームトラックを ii) から南へ 1000km 移動させた実験である。iii) の条件は、ESM の有効性が失われるほど大きなストームトラック変位である。結果として、ベータ平面・球面モデルのどちらにおいても我々のメカニズムは有効に働くことがわかった。

キーワード: 大気力学, 低周波変動, 総観規模気象学, ブロッキング, 非線形, 対流圏科学

Keywords: Atmospheric dynamics, Low-frequency variability, Synoptic-scale meteorology, atmospheric blocking, nonlinear, Tropospheric Science

MIS021-09

会場:202

時間:5月22日 11:15-11:30

木星大気大規模渦の数値実験：大規模渦の生成メカニズム

Numerical experiments of large-scale vortices in Jupiter's atmosphere: The generation mechanism of large-scale vortices

加藤 亮平^{1*}, 杉山 耕一郎², 中島 健介³

Ryohei Kato^{1*}, Ko-ichiro SUGIYAMA², Kensuke Nakajima³

¹ 九大院理, ² 北大・低温研, ³ 九大院理

¹ Graduate School of Sciences, Kyushu Univ., ² Inst. of Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., ³ Faculty of Sciences, Kyushu Univ

1. はじめに

木星大気の大赤斑は直径が2万 km を超える大規模な渦であり、100 年以上持続している。Williams(1996; 以下 W96) は 3 次元モデルを用い大赤斑のような大規模渦を再現した。しかし長時間計算後には、ジェット(東西平均東西風)の強さは減少し、大規模渦も減衰してしまった。木星のジェットの強さは長期間に渡って顕著な変化していないため、W96 で見られたジェットの減衰は観測と整合的でない。もしこのジェットの強さを維持すると、減衰の有無などの大規模渦の振る舞いが異なることが予想される。そこで、本研究では東西平均場を維持するための強制を導入することでジェットの維持を試み、強制的強さによって統計的定常状態における渦の振る舞いにどのような違いが見られるのか調べた。

2. 数値モデルと実験設定

ビジネス近似をした球面 3 次元のプリミティブ方程式系を用い、木星大気のパラメータの元で計算を行った。計算領域は経度方向に 180 度(周期境界)、緯度方向に赤道から南緯 40 度、鉛直領域は 10000 km とした。初期場は W96 の実験の中で最も観測と整合的な ケース A4 と同じとした。すなわち、安定成層領域と南北に風速が交互に変わるジェットが計算領域の上部に集中した構造である。

以上の設定は W96 と同じであるが、本研究ではさらに、ジェットの構造・強さを維持するための強制として、以下の 4 つの種類の強制を広範囲の緩和時間(30 日, 100 日, 300 日, 1000 日, 2000 日, 4000 日)で加え、計 19 の実験を行った。強制なし、運動量強制のみ：東西平均東西風速を初期に戻す強制、熱強制のみ：東西平均温度を初期に戻す強制、両方の強制：運動量強制・熱強制の両方を同じ緩和時間で加える。時間積分は実験によって異なるが、10000 日から 70000 日間行った。

3. 結果

3.1. 統計的定常状態の実現の可否

熱強制と運動量強制の両方を緩和時間 100 日, 300 日, 1000 日, 2000 日で加えた 4 つの場合で統計的定常状態が得られた。一方、熱強制のみ、運動量強制のみの場合は、帯状平均場のエネルギーが増加し続け定常にならなかった。また、両方の強制を緩和時間 30 日で加えた場合は擾乱の運動エネルギーが増加し続け定常にならなかった。また、両方の強制を緩和時間が 4000 日で加えた場合は、平均場の位置エネルギーが約 35000 日という長い周期で変動をしており、統計的定常状態と判定するにはより長時間の計算が必要であった。

3.2. 擾乱の特徴(スケール, 寿命, 場所)と性質(運動量・熱輸送, エネルギー変換)

平均場・擾乱ともに定常状態が得られた場合の擾乱の振る舞いは強制的強さに依存した。

(a) 強制が強い場合(緩和時間 100 日, 300 日): 大規模渦が 500~1000 日おきに生成されるが、寿命は短かった(500~1000 日)(東西幅~90000 km, 南北幅~10000 km)。この大規模渦は、東西平均したポテンシャル渦度の南北微分が南北方向に符号を変える緯度(θ_0)をはさんで南北に渡って存在した。また、この大規模渦のスケール(低波数)の擾乱は西風運動量の南北輸送が大きく、東西平均場から擾乱へのエネルギー変換は順圧エネルギー変換が正(傾圧エネルギー変換は負で絶対値は順圧エネルギー変換の?以下)という性質を持っていた。

(b) 強制が弱い場合(緩和時間 1000 日, 2000 日): 大規模渦は形成されず、 θ_0 の南と北に異なるスケールの擾乱が存在した。 θ_0 の北側では小規模な(東西波長~13000 km)波動が卓越し、熱の南北輸送が大きく傾圧エネルギー変換が正であった。一方、南側では大規模な(東西波長~60000 km)波動が見られ、順圧エネルギー変換が正であった。

3.3. 線形安定性解析

強制が強い場合と弱い場合について東西時間平均場を基本場として線形安定性解析を行った。その結果、上述の非線形計算で現れた 3 種類の擾乱の東西波長・位相構造と似た構造を持つ不安定モードが存在することがわかった。また、これらの不安定モードの運動量・熱輸送やエネルギー変換などの性質も非線形計算の擾乱と同じであった。このことから、非

線形計算で現れた擾乱は基本場の不安定で生成されたことが示唆される.

3.4. 大規模渦生成のメカニズム

大規模渦生成の観点から注目すべきは, 強制が強い場合の大規模な擾乱は非線形計算・線形計算ともに平均場から擾乱への順圧エネルギー変換が大きかったことである. このことから, 強制が強い場合に現れた大規模渦の成因は, 小さい渦からのアップワードカスケードではなく順圧不安定が原因であることが推測される.

キーワード: 木星大気, 大規模渦, 大赤斑, 数値実験, 順圧不安定, 線形安定性解析

Keywords: Jupiter's Atmosphere, large-scale vortices, The Great Red Spot, numerical experiment, barotropic instability, linear stability analysis

MIS021-10

会場:202

時間:5月22日 11:30-11:45

平面における帯状流の相互作用について The interaction between zonal jets on a beta plane

小布施 祈織^{1*}, 竹広 真一¹, 山田 道夫¹
Kiori Obuse^{1*}, Shin-ichi Takehiro¹, Michio Yamada¹

¹ 京都大学 数理解析研究所

¹RIMS, Kyoto University

惑星上の大規模な流れを取り扱う際に用いられるモデルの1つである回転球面上の2次元強制非圧縮性流体モデルでは、流れの時間発展の過程において東向きと西向きのジェットが緯度方向に交互に多数本並ぶ縞状構造が形成されるが (Nozawa and Yoden¹), さらに時間積分を進めると、これらの東西ジェットは非常にゆっくりと融合・消滅を繰り返し、漸近状態として2本もしくは3本という少数本のジェットから成る構造が実現される (Huang *et al.*², Obuse *et al.*³).

上記の球面上でのジェットの融合・消滅機構に対する可能な解釈の1つに、縞状構造はダイナミックに不安定であり、背後に存在する乱流の影響を受けてより安定な少数本ジェット構造へと遷移するというものがある。このメカニズムを考慮したジェットの融合・消滅機構の単純なモデルとして、ベータ平面上で、東西方向にsin型で変化する南北流を背景に持つ東西流モデルを用いることがある。Manfroi and Young⁴によって導入されたこのモデルでは、弱非線形状態の数値計算によって、多数本の東西ジェットから成る縞状構造が形成された後、非常にゆっくりとしたジェットの融合・消滅によってジェットの本数が減少することが知られている。

本研究では、Manfroi and Young⁴ で用いられた方程式の、定常ジェット解の解析的表現 $U_0(x)$ (Obuse *et al.*⁵) を用い、ジェット間の弱い相互作用を摂動的に評価することによって、ジェットの融合・消滅を議論する。十分に離れて位置する2つのジェットが、大きさが $O(\epsilon)$ の十分に小さいtail部分で弱い相互作用しているときに、全体の流れが近似的に $U(x, t) = U_0(x - l_1(t)) + U_0(x - l_2(t)) + V(x, t)$ と書き表されるとし、さらに $l_1(t), l_2(t) = O(1)$, $V(x, t) = O(\epsilon^3)$, 時間微分 = $O(\epsilon^2)$, x 方向微分 = $O(1)$ という仮定を置く。ここで l_1, l_2 は2つのジェットの中心位置であり、 V は2つのジェットの定常ジェットからのずれに対応する。微小量 ϵ を用いた摂動展開を行い上記の仮定の下で見積もられたジェット間距離の時間変化と、数値的時間積分から得たジェット間距離の時間変化は、振る舞いの点で良い一致を示し、値の点においてもある程度的一致を示した。このことは、ジェットのManfroi and Young⁴ の数値計算でみられたジェットの融合・消滅が隣接するジェット間のtailを通じての相互作用で説明され得る可能性を示唆している。

参考文献:

- [1] T. Nozawa and S. Yoden, *Physics of Fluids*, 9, pp.2081-2093, 1997.
- [2] H-P. Huang, B. Galoerin, and S. Sukoriansky, *Physics of Fluids*, 13, pp.225-240, 2001.
- [3] K. Obuse, S. Takehiro, and M. Yamada, *Physics of Fluids*, 22, 156601, 2010.
- [4] A. J. Manfroi and W. R. Young, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56, pp.784-800, 1999.
- [5] K. Obuse, S. Takehiro, and M. Yamada, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会 MIS004-08

キーワード: 回転流体, 順圧流, 乱流, 東西ジェット, ベータ効果

Keywords: rotating fluid, barotropic flow, turbulent flow, zonal jets, beta effect

回転球殻内における Boussinesq 熱対流による平均帯状流生成メカニズム Mean-zonal-flow generation in Boussinesq thermal convection in a rotating spherical shell

木村 恵二^{1*}, 竹広 真一¹, 山田 道夫¹
Keiji Kimura^{1*}, Shin-ichi Takehiro¹, Michio Yamada¹

¹ 京都大学数理解析研究所

¹ Res. Inst. Math. Sci.(RIMS), Kyoto Univ.

恒星や巨大惑星の内部および地球型惑星の流体核では、内部に存在する熱源や外部からの冷却によって天体規模の熱対流が引き起こされていると考えられている。回転球殻内における Boussinesq 熱対流問題は、これらの熱対流現象の性質を調べるもっとも基本的な問題である。この熱対流問題は前世紀中頃 Chandrasekhar によって系が提唱されて以来、半世紀以上にわたって解析的にも数値的にも多くの研究がなされてきた。しかしこれら多くの研究にもかかわらず、臨界点から分岐した解の熱対流パターンやその安定性といった、熱対流の分岐構造についての基礎的な性質は依然として明らかでない。

そこで我々は、臨界点から分岐し経度方向に伝播する(非線形)定常進行波の安定性と分岐構造を調べた。その結果、内殻と外殻の半径比が 0.4, Prandtl 数が 1 の場合, Taylor 数が 52^2 から 500^2 の範囲では、臨界点から、経度方向に伝播する経度方向基本波数が 4 の定常進行波(TW4)が分岐し, Rayleigh 数 Ra が $Ra_c < Ra < 1.2 Ra_c - 2Ra_c$ (Ra_c : 臨界 Rayleigh 数)の範囲で安定であることを見出した [1]。さらに、この定常進行波の伝播方向は、臨界点近傍では Taylor 数の増加とともに retrograde から prograde に変化するが、Taylor 数が大きい場合、Rayleigh 数が臨界点から増大するとき、prograde から retrograde に再び変化することが分かった。前者の臨界点近傍における伝播方向の変化は渦の伸縮メカニズム [2] により物理的に説明されるが、後者の定常進行波の伝播方向の変化は、振幅の増大した解の非線形効果によって赤道中央付近に強い retrograde な平均帯状流が生成され対流セルが移流されるためであると考えられる。

本研究では、この有限振幅の定常進行波の伝播方向を決定する要因である平均帯状流が生成されるメカニズムを、数値的な弱非線形解析を用いて調べる [3]。対象とするパラメータ領域は以前の研究と同様、内殻と外殻の半径比を 0.4, Prandtl 数を 1 とし, Taylor 数は 52^2 から 860^2 の範囲である。この領域では臨界点から TW4 が分岐する。

まず、回転系における静止状態のまわりで支配方程式を線形化して臨界モードを求め、この臨界モードを非線形項に代入して、誘起される二次的な平均流と温度分布を数値的に計算した。ただし非線形項は運動方程式 (Navier-Stokes 方程式) の移流項 3 項とエネルギー方程式 (熱方程式) の移流項 1 項の計 4 項存在するが、それらを

- (1) 運動方程式経度方向成分,
- (2) 運動方程式余緯度・動径方向成分,
- (3) エネルギー方程式,

の 3 つに分類する。各非線形項の平均帯状流生成メカニズムは、

- (1): レイノルズストレスによる子午面内での角運動量輸送によって平均帯状流が生成,
- (2): レイノルズストレスにより引き起こされる平均子午面循環に対してコリオリ効果が作用することで平均帯状流が生成,
- (3): 対流の熱輸送により生じる二次的な平均子午面温度場の緯度傾度によって誘起される平均子午面循環に対してコリオリ効果が作用することで平均帯状流が生成,

となる。

(1)-(3) の各非線形項が生成する平均帯状流をそれぞれ計算しその強さを比較した。今回調べたパラメータ領域では、Taylor 数が大きい場合に赤道中央付近に見られる強い retrograde な平均帯状流の生成にもっとも大きく寄与しているのは上記の (3) のエネルギー方程式の非線形項であり、(1) と (2) の運動方程式の非線形項の寄与に比べて数倍大きいことが見出された。

[1] 木村恵二, 竹広真一, 山田道夫, 京都大学数理解析研究所講究録 1724, pp.200-211 (2010)

[2] S. Takehiro, J. Fluid Mech., Vol.659, pp.505-515 (2010)

[3] S. Takehiro, Y.-Y. Hayashi, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol.90, pp.43-77 (1999)

キーワード: 分岐, 定常進行波, 平均帯状流, 弱非線形解析

Keywords: bifurcation, traveling wave, mean zonal flow, weakly nonlinear analysis

MIS021-12

会場:202

時間:5月22日 12:00-12:15

海洋によって誘起される黒潮続流上流の長周期変動 Long-term variations of the upstream Kuroshio Extension based on self-sustained dynamic modes.

橋本 紘典^{1*}, 松浦知徳¹, 西山浩司², 碓氷典久³

Hironori Hashimoto^{1*}, Tomonori Matsuura¹, Koji Nishiyama², Norihisa Usui³

¹ 富山大学大学院理工学教育部, ² 九州大学工学部, ³ 気象研究所

¹Graduate School of S and E, Toyama Univ, ²Faculty of Engineering, Kyushu Universit, ³Meteorological Research Institute

1. Introduction

Variations of upstream KE jet exhibits two flow patterns (Qui and Chen, 2005). The first pattern is quasi-stationary meanders of two bumps with intensive southern recirculation gyre (first mode). Another flow pattern is unstable and shows high-amplitude meanders with a weakened southern recirculation gyre (second mode). The upstream KE jet varies between the first mode and the second mode with decadal time scales.

Many studies have pointed out the importance of nonlinearity in the ocean by itself to induce the decadal time scale changes (Primeau and Newman 2008, Shimokawa and Matsuura 2011), which is main topic of this study. Firstly, using self-organization map (SOM) analysis we examine the variations of upstream KE jet in more detail and variation pattern were sorted out. Secondly, we make a reconstruction of attractor of Sea-Surface Height (SSH) to reveal whether this phenomenon is the chaotic one or not.

Moreover, we investigate this phenomenon by simulating an OGCM (MOM3) of the North Pacific Ocean forced by seasonal climatological winds for 30 years.

2. Used data and methods

SSH data of MOVE/MRI.COM-WNP were used to analyze the characteristics of KE jet. The used data are averaged over 10 days from early January 1993 to late December 2005. The domain of MOVE/MRI.COM-WNP covers over the sea areas of 117E - 160W, 15N - 65N in the North Pacific. The horizontal resolution is 0.1x 0.1.

SSH are extracted in the ocean area of 141E - 153E, 30N - 40N to carry out SOM analysis and to estimate the mean strength of the upstream KE jet. The size of SOM in our analysis is 169, that is 13 x 13 matrix. We make a reconstruction of attractor of the time series of SSH anomalies by transforming observed time series into delayed time series.

Moreover, we simulated the North Pacific Ocean to confirm the long-term variations of the upstream KE based on self-organized dynamic modes. The OGCM used in this study is the GFDL Modular Ocean Model version 3 (MOM3). Computational domain covers the North Pacific (110E-75W, 20S-60N). The model has a horizontal resolution varying from 1/12 around Japan (125E-160E, 20N-50N) to 1/2. The model topography is based on 1/12 ETOPO5 data.

3. Result

The time series of strength of upstream KE jet obtained from ocean data assimilation corresponds well to Topex/Poseidon altimeter results of Qui and Chen (2005). The upstream KE jet was strong in 1993-94, weakened to 1997, and strengthened to 2004 again.

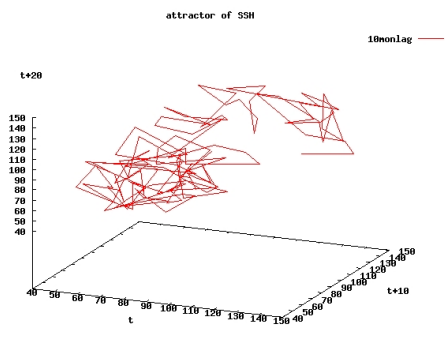
SOM analysis revealed two long-term disparate variation patterns. The first is the stable pattern with strengthening southern recirculation. The second is the unstable pattern with weak southern recirculation. Patterns in 1993-94 and 2002-2005 were sorted out as the stable pattern and pattern in 1996-2001 was sorted out as the unstable pattern.

As a result of a reconstruction of attractor, an obtained pattern could not be recognized as the strange attractor completely. However, it was spatially divided into two parts.

The interannual variability appeared in SSH data obtained from a simulation of the OGCM (MOM3). In particular, the variability in the simulation showed strengthening/weakening of southern recirculation and north-south shift of upstream KE jet axis which confirmed by analyzing MOVE/MRI.COM-WNP.

4. Discussion

It is clear that the variability in strength of upstream KE jet corresponds to the variability in stable-unstable pattern. In particular, when upstream KE jet is stable (unstable), the strength of upstream KE jet is strong (weak). Obtained attractor which was spatially divided into two parts indicates that the time series of strength of upstream KE jet is not completely random, but it possess certain unique behavior. The results of OGCM simulation indicate that the nonlinearity in the ocean itself affects on variations between stable and unstable of the upstream KE jet and north-south shifts of KE jet axis.



MIS021-13

会場:202

時間:5月22日 12:15-12:30

低プラントル数流体の熱対流：数値計算による振動現象の再現 Thermal convection in low Prandtl number fluids: generation of oscillatory phenomena by numerical simulations

柳澤 孝寿^{1*}, 櫻庭 中², 山岸 保子¹, 浜野 洋三¹

Takatoshi Yanagisawa^{1*}, Ataru Sakuraba², Yasuko Yamagishi¹, Yozo Hamano¹

¹ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, ² 東京大学大学院理学系研究科

¹IFREE, JAMSTEC, ²School of Science, Univ. of Tokyo

The study on the nature of thermal convection in low Prandtl number (Pr) fluids is essential for the dynamics of the Earth's outer core, and the difference of the flow behavior from $Pr \sim 1$ fluids like water and air is very important. In lower Pr fluids, the two-dimensional steady roll structure emerging at the onset of convective flow easily becomes time-dependent just above the critical Rayleigh number (Ra), and theoretical studies propose oscillatory instability such as "traveling-wave convection" in the direction of the roll axis. Transition to turbulence with increases in Ra in low Pr fluids occurs at much lower Ra than water or air, and large-scale flow is also expected to emerge easily.

Our laboratory experiments on thermal convection with liquid metal by using an ultrasonic velocity profile measurements visualized the flow pattern in a gallium layer with simultaneous measurements of the temperature fluctuations, from 10 to 200 times above the critical Ra (Yanagisawa et al., 2010). In those experiments, the presence of a roll-like structure with oscillatory behavior was established, even in the Ra range where the power spectrum of the temperature fluctuation shows features of developed turbulence. The flow structure was interpreted as a continuously developed one from the oscillatory instability of two-dimensional roll convection around the critical Ra . It was shown that both the velocity of the flows and the frequency of the oscillation increase proportional to the square root of Ra , and that the oscillation time of the roll structure is comparable to the time to complete one circulation of the flow.

We made up a code for numerical simulation of thermal convection to compare with the results obtained by the laboratory experiments. Furthermore, we analyzed the fine scale structure and short time variation relating to turbulence, those are difficult to obtain by laboratory experiments due to the limitation of measurements. The numerical simulation is performed for three dimensional rectangular box, with no-slip boundary conditions at all boundaries, fixed temperature at the top and bottom, and insulating at side walls. The range of Ra for numerical simulations is from critical value to 200 times above it. The material properties of the working fluid are those of liquid gallium and $Pr=0.025$. We used enough grid points to resolve the small-scale behavior without any assumption for the turbulence. Our numerical result reproduced oscillatory convection patterns as observed in the experiments. Statistical values, such as the relation of the circulation time and oscillation period, Rayleigh number dependence of the mean velocity and the oscillation frequency, are good agreement in both laboratory and numerical studies. This confirms that both of our laboratory experiment and numerical simulation are reliable ones. The series of numerical simulations with the increase in Ra revealed the onset point of oscillatory convection and subsequent transition to turbulence. The power spectrum densities calculated from the velocity and temperature dataset clearly indicate the feature of low Pr fluid, that is, temperature is more diffusive than momentum and the corner frequency is higher for velocity spectrum in the region of developed turbulence.

キーワード: 熱対流, 低プラントル数, 数値シミュレーション, パターン, 乱流

Keywords: thermal convection, low Prandtl number, numerical simulation, pattern, turbulence

MIS021-14

会場:202

時間:5月22日 12:30-12:45

円筒容器内で回転する水の表面の変形 Deformation of water surface rotating in a cylindrical tank

渡辺 俊一^{1*}, 伊賀 啓太², 横田 祥², 新野 宏², 三澤 信彦²
Shunichi Watanabe^{1*}, Keita Iga², Sho Yokota², Hiroshi Niino², Nobuhiko Misawa²

¹ 東京大学理学部, ² 東京大学大気海洋研究所

¹School of Science, The Univ. of Tokyo, ²AORI, The Univ. of Tokyo

地球や惑星の大気中に見られる渦には、軸対称性が失われて様々な構造を持つものが見られる。このような現象の例は、円筒容器に水を入れ、容器の底に取り付けられた円盤を回転させた実験でも見られ、水面の形が多角形になるという現象が知られている。

本研究ではこの室内実験において、軸対称から多角形に移り変わるパラメータ領域に注目した。その結果、水面が大きく振動する状態と振動がなく軸対称となる状態を繰り返す現象および同じ回転数でも、円盤の回転数を上げていくときと下げていくときで異なった状態となる履歴現象を見つけた。これらの現象の水深や回転数などのパラメータに対する依存性を明らかにした。振動現象は水深がある水深より大きいところでのみ起こり、水深を深くするにつれて起こる回転数が小さくなっていった。一方、ヒステリシスが起こる領域は水深を深くするにつれて回転数が高いほうへ変化した。

また簡単な力学モデルでこれらの実験結果を説明した。流体を内側と外側の2つの領域にわけ、流速を領域ごとに1つの値で代表させた。擾乱は流体の不安定で成長すると考え、擾乱による運動量交換の効果を考慮した。この力学モデルを解析することによって履歴現象を再現することができた。

キーワード: 回転流体, 室内実験, 振動, 履歴現象

Keywords: rotating fluid, laboratory experiment, oscillation, hysteresis