

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540514

研究課題名(和文)金星大気大循環モデルの高度化に向けた微細擾乱の数値実験

研究課題名(英文) Numerical experiments of small-scale eddies toward the sophistication of Venus atmosphere general circulation model

研究代表者

山本 勝 (Yamamoto, Masaru)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：10314551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：金星や地球を含めた地球型惑星大気力学の理解を深めるために、金星大気大循環モデルの高度化に向けた微細擾乱の数値実験を行った。地表付近と雲層内の3次元マイクロスケール気象シミュレーションによって、対流調節や対流混合が静的安定度の鉛直構造や地表風の構造に与える影響を調査した。微細擾乱の数値実験と並行して、高度化するベースモデル(大気大循環モデルと微物理モデル)の整備を行った。特に、金星大気大循環モデルの妥当性を議論するために、モデルの中の極渦の力学等を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Numerical experiments of small-scale eddies were conducted toward the sophistication of Venus atmosphere General Circulation Model (GCM), to deeply understand atmospheric dynamics of terrestrial planets (including Venus and Earth). Based on 3-D microscale meteorological simulations, the present work investigated influences of convective adjustment and mixing on the atmospheric structures of static stability and near-surface wind. In addition, the base models (GCM and microphysical model) were also improved in the present study. To discuss the validity of the Venus atmosphere GCM, the dynamics of the polar vortex in the model were elucidated.

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：金星大気 対流 波動 大気大循環 地球流体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外のいくつかのグループでは金星 GCM の放射モデルの高度化を行っているが、パラメータ依存がかなり強く、放射の改良が GCM の改善に必ずしもつながらない。放射の改善や現実的な加熱だけでは下層のスーパーローテーションの再現は難しく、モデル格子間隔よりも小さな波動や対流による運動量輸送を考慮する必要性が議論され始めている (Ikeda et al. 2008, EPSC Munster)。さらに、光化学モデルでは雲層上部でかなり大きな渦拡散が要求され (Yung and Demore 1982)、雲モデルでも雲層内の対流層で大きな鉛直渦拡散が要求される (Imamura and Hashimoto 1998)。また、鉛直 1 次元の放射モデルでも、対流調節による大きな渦拡散が要求される (Matsuda and Matsuno 1978)。このように、力学 (運動量輸送) のみならず、化学、雲、放射モデリングの物質輸送・熱輸送においても、モデル格子間隔よりも小さな波動や対流による渦拡散が重要である。しかしながら、金星において、このような渦拡散を見積もるモデル研究はほとんどない。本研究では金星で観測されている時空間の微細構造と渦拡散との関連を議論するため、「モデル格子間隔 (数 1000 km) よりも小さな波動や対流」に着目する。

(2) 加えて、微細構造をパラメタライズしたサブルーチンを組み込む先の「大気大循環モデル」と「関連した微物理過程」の高度化も並行して行わなくてはならない。

2. 研究の目的

(1) 気球観測で得られた気温と鉛直流の時系列データや高解像衛星画像データから推定される対流の数値実験をもとに、渦拡散係数を求める。また、地表面に関しては、渦拡散係数、惑星境界層高度、摩擦速度を求める。

(2) 過去の近赤外画像から得られた波動構造をもとに、「重力波の飽和 (ここでは、背景風速 = 位相速度になる臨界高度付近に達した波の振幅が増大し、不安定化し、対流や乱流が起こる)」の数値実験を行い、渦拡散係数を求める。

(3) 上記の成果をパラメタライズしたルーチンを組み込む先であるベースモデルの GCM と微物理過程モデルの整備を行う。

3. 研究の方法

(1) 金星大気の微細構造をシミュレートするために、Weather Research and Forecasting model を金星条件に適用した (Yamamoto 2011 Icarus, 2014 EPS)。本課題では、地表付近と下層雲のマイクロスケール気象シミュレーションを行った。

(2) 経度-高度 2 次元赤道モデルを用いて、惑星スケール波の碎波と Cloud-feedback heating (CFH) による微細構造を調査した (山本 2013 宇宙研・第 27 回大気圏シンポジウム)。モデルと基本場は Yamamoto (2001 JAS, 2003

JMSJ) と同じだが、波の強制パラメータに関する感度実験や 8 日波について追加実験を行った。臨界高度が雲内の不安定度層 (55 km) 付近に存在する 5.5 日波と 8 日波は、モデル下端から東西波数 1 の geopotential height 変動で強制する。CFH のパラメタリゼーションは、Smith et al. (1993) をもとに Yamamoto (2003) の方法を用いた。Smith et al. (1993) の無次元強制パラメータや無次元鉛直構造関数 $f(z)$ を導入し、鉛直流による金星下層雲の濃淡変動に伴う加熱・冷却分布を表現した。

(2) 微細構造をパラメタライズしたサブルーチンを組み込む先のベースモデルの開発については、CCSR/NEIS AGCM を金星中層大気に適用した (Yamamoto and Takahashi 2012 Icarus)。また、雲の物質輸送の微物理モジュールの高度化に関しては、Yamamoto (2004 AST) のスキームを、核形成・凝結の誤差評価を行った (Yamamoto 2012 AAQR)。

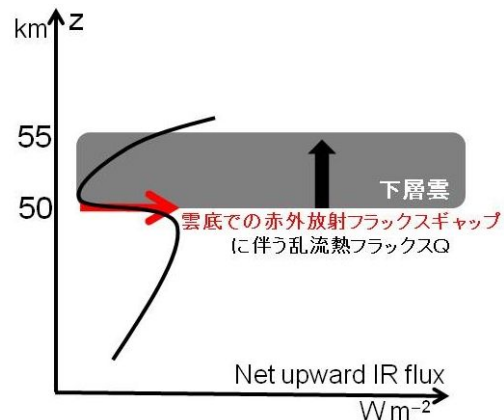


図 1 Yamamoto(2014)で導入した下層雲下部境界の乱流熱フラックス Q 。雲底での赤外放射 f_{IR} のギャップに伴う下層雲下部境界の乱流熱フラックスをパラメータ Q とする。

4. 研究成果

(1) 金星大気大循環モデリングの高度化に向けて、Weather Research and Forecasting model を用いて、地表付近のマイクロスケール気象シミュレーションを行った。本研究では、Yamamoto (2011 Icarus) では検討されていない運動量輸送過程について詳しく調べた。特に、対流調節による運動量輸送の地表風速依存性を明らかにした。金星 GCM の高度化に向けた 3 次元マイクロスケール数値実験を行った。非常に弱い super-rotation ($\sim 0.1m/s$) では、対流調節によって、地表付近で sub-rotation が生じる。このように、金星地表付近で super-rotation であっても、その値が非常に小さいと、対流調節によってたやすく sub-rotation となり、地面からの角運動量供給が可能になる (Yamamoto 2012 EPSC Madrid)。

(2) 金星の雲層において、これまでメソスケール対流の重要性のみ議論されてきたが、「雲層下部での対流調節」や「雲底での赤外放射 f_{IR} のギャップに伴う熱フラックス

スQ (図1)」が 1km 程度の擾乱を生み出しうることを数値実験で例証した。観測で見られる静的安定度の微細構造と重力波放出に関して、雲底での熱 f_{1u} x 強度依存性や気温・風速の初期値依存性を調査し、その結果をまとめた。対流層内のマイクロスケール渦が弱いと「鉛直波長が短い波型の安定度鉛直分布」が形成され、対流層の渦が強く活発だと「局所的に増大する安定度鉛直分布」が形成される。どちらのタイプの安定度鉛直分布が出現するか否かは、対流層内のマイクロスケール擾乱強度に大きく依存していると考えられる(Yamamoto 2014 EPS)。

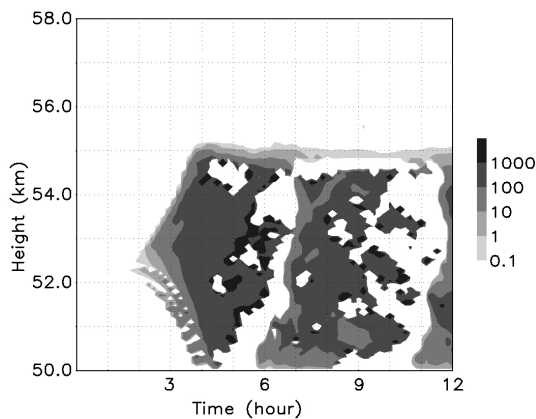


図2 Passive tracer の渦拡散係数。
 $Q = 0.001 \text{ K m/s}$.

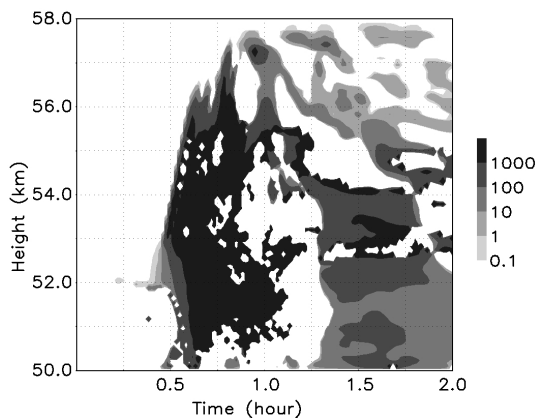


図3 Passive tracer の渦拡散係数。
初期値 $d\theta/dz = -1 \text{ K/km}$ の対流調節。

高度 50 - 55 km の初期温位減率をパラメータとした対流調節実験では、混合層内で非常に大きな渦拡散係数値をもつ(図2)が、初期温位減率にはあまり依存しない。この渦拡散係数値は、鉛直 1 次元放射対流平衡モデルで要求される値と同程度の大きさである。また、高度 50 km の熱 f_{1u} x をパラメータとした対流混合実験で、雲層内の対流混合の発達やそれに伴う渦拡散係数を見積もった(図3; Yamamoto 2011 EPSC-DPS Joint Meeting Nantes; 2012 AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly Singapore)。

(3) マイクロスケール実験成果を GCM に導

入するためには、パラメータ化したルーチンを組み込む先であるベースモデルの整備も不可欠である。そのために、さまざまな境界条件で金星中層大気大循環モデルの予備実験を行った。いくつかのケースでは、スーパーローテーション、Y 字形雲模様、極渦が再現された。熱潮汐波が存在する中で、惑星スケール波動が振幅変調することによって Y 字形の雲模様が維持される。高緯度では Polar dipole や Cold collar に似た雲頂の極渦構造がシミュレートされた。加えて、雲底の極渦を詳しく調査した。雲頂と異なり、雲底では温度の帯状構造が卓越するので、温度コントラストが雲底の極域渦の濃淡を表わすことができない。温度ではなく、擾乱による水平収束や渦度のコントラストが極域の雲底で卓越する。このことから、雲底で観測される極域渦模様は、温度コントラストよりも渦度や発散と関連した雲粒子や吸収物質の濃淡を反映している可能性が示唆される(Yamamoto and Takahashi 2012 Icarus; 2013 International Venus Conference Catania)。

(4) 金星雲では乱流拡散と微物理過程を結合させる必要があるため、微物理過程(核形成・凝縮過程)ルーチンの整備も行った。Yamamoto (2004) のスキームの精度の検証し、時間ステップサイズや凝結速度を用いた特徴的長さスケール D_{CFL} と誤差の関係を明らかにした(Yamamoto 2012 AAQR)。この成果は、金星微物理モデルの時間ステップサイズを決定する際、有用であると期待される。

(5) 惑星スケールの 5.5 日波と 8 日波の碎波と Cloud-feedback heating (CFH) について、赤道高度 2 次元モデルの波動の強制および加熱パラメータを変えた感度実験を行い、対流や波動による帯状平均鉛直運動量 f_{1u} x や帯状平均鉛直熱 f_{1u} x について詳しく調べた(山本 2013 宇宙研・第 27 回大気圏シンポジウム収録)。低安定度層内の対流熱輸送は、碎波実験と CFH 実験の両方で上向きである。5.5 日波と 8 日波の碎波では低安定度層の下で大きな下向き熱輸送が見られるが、CFH の対流では、低安定度層の上端・下端で小さな下向き熱輸送が形成される。

低安定度層で形成された重力波は、負の運動量 f_{1u} x となる。8 日波の場合、低安定度層下端で碎波が起こり、その影響が低安定度層下部に集中するので、対流活動が弱く、低安定度層全体では上向き熱 f_{1u} x も碎波に伴う負の運動量 f_{1u} x も小さい。静的安定度の鉛直分布では、弱い対流活動のため、貫入に伴うシャープな変動は形成されず、低安定度層より上と下で小振幅の波動構造が見られる。他方、5.5 日波の場合、低安定度層全体で碎波が起こり、低安定度層内で重力波運動量輸送が大きい。静的安定度の鉛直分布では、碎波による対流に伴う貫入によって低安定度層直上と直下で薄いシャープな変動が見られる。低安定度層より上では、重力波による波動構造が形成される。

CFHの場合,負の鉛直運動量 f_{1u} が高さとともに徐々に減少する。低安定度層内で f_{1u} が急変する碎波実験と比較して,CFHと対流で励起された重力波は効率よく鉛直伝播する。5.5日波の碎波同様に,CFHの対流は低安定度層全域に及ぶので,静的安定度鉛直分布では低安定度層直上と直下で貫入による薄いシャープな変動が見られ,低安定度層より上で重力波による波動構造が形成される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Yamamoto, M. Idealized numerical experiments on microscale eddies in the Venusian cloud layer, Earth Planets Space, 査読有, 66:27, 2014, doi:10.1186/1880-5981-66-27

Yamamoto, M., Numerical error analysis of solvers using cumulative number distribution with volume-ratio grid spacing in initially particle-free nucleation-condensation systems, Aerosol and Air Quality Research, 査読有, 12, 2012, 1125-1134, doi: 10.4209/aaqr.2012.02.0042

Yamamoto, M. and M. Takahashi, Venusian middle-atmospheric dynamics in the presence of a strong planetary-scale 5.5-day wave, Icarus, 査読有, 217, 2012, 702-713, doi: 10.1016/j.icarus.2011.06.017

〔学会発表〕(計7件)

Yamamoto, M. and M. Takahashi, Simulation of Venus' polar vortex in the presence of diurnal thermal tide, International Venus Conference, 2013年6月10日, Catania, Italy.

山本勝, 重力波で生じる金星大気の微細構造に関する数値実験, JAXA 宇宙科学研究所・第27回大気圏シンポジウム, 2013年03月01日, 相模原市

Yamamoto, M., Wind structures after convective adjustment and in convective mixing near Venus' surface, European Planetary Science Congress 2012, 2012年09月27日, Madrid, Spain.

Yamamoto, M., Microscale Simulations of Convective Mixing in the Venus Cloud Layer: Comparison with Observations, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012年08月14日, Singapore, Singapore.

Yamamoto, M. and M. Takahashi, Development of a middle atmosphere GCM for analyzing the Venus meteorological data, 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012年07月20日, Mysore, India.

Yamamoto, M., Microscale simulations of convective adjustment and mixing in the Venusian cloud layer, EPSC-DPS Joint

Meeting 2011, 2011年10月6日, Nantes, France.

Yamamoto, M., K. Ikeda, and M. Takahashi, Recent progress of the Venus general circulation model, XXV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics(招待講演), 2011年7月1日, Melbourne, Australia.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K002831/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 勝 (YAMAMOTO, Masaru)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号: 10314551