研究課題名：系外惑星大気シミュレーションモデルの開発:火星ダスト循環過程の実装実験

課題代表者：北海道大学大学院理学研究院　石渡正樹
共同研究者：九州大学 大学院理学研究院　中島健介
北海道大学大学院理学院　荻原弘尭
神戸大学大学院理学研究科　林 祥介

実施年度：平成 25 年度～平成 25 年度

1. 研究目的

本研究における目的は、天文観測で次々と発見されている系外惑星の気候探索にも切り込んでいける惑星大気用大循環モデルの開発である。そのために、観測可能な太陽系内の惑星を参照点としてとらえ、その数値実験を通してモデルのポリッシュアップをおこない系外惑星計算にも耐えうるモデルの開発を目指すものである。本課題はその取り組みの一環として、火星気候を特徴づけるダストの循環過程に関する数値スキームの増強整備とそれらを用いた実装実験、観測との比較実験を中心に行う。火星では、数年周期で惑星全体を覆う大砂嵐（グローバルダストストーム）が発生する。グローバルダストストームの発生条件を含め、火星ダスト動態には未解明な部分が多く残されている。これに対して、火星のダストの動態を探ることを１つの目的とした日本による探査計画（MELOS）が進められている。本課題のモデル開発は探査計画の遂行に必要となる火星大気のシミュレーションモデルの構築にも資するものとなる。なお、実装実験においては、火星設定の計算のみならず、水蒸気の移流を扱う地球設定実験も行い、適宜地球における観測結果と比較しながら、スキームの改良につなげることにする。

2. 研究計画

大気大循環モデルに、火星に固有なダスト過程、すなわち大規模風応力による巻き上げ過程、局所的な対流による巻き上げ過程、移流過程、重力沈降過程を実装し、その実装実験を行う。昨年度は、大規模風応力による巻き上げ過程および物質移流過程の実装作業をおこなった。本年度は局所的な対流による巻き上げ過程と重力沈降過程の実装を行う。その後に観測との比較実験をおこなう。実装実験に関しては、まず昨年度導入したセミラグランジュ法物質移流スキームの性能評価を行うため、地表面ダストフラックスとして一様な値を与えた場合についての計算をおこなう。その後に、順次巻き上げ過程を組み入れた実験をおこなっていく。用いるモデルは、我々がこれまでに開発を行ってきた大気大循環モデル dcpam5（http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam）である。これは、三次元球殻上のプリミティブ方程式を用いたスペクトルモデルである。

3. 進捗状況

モデルの実装作業に関しては、現在までにダストの重力沈降過程を表現するスキームを導入した。このスキームは、Conrath（1975）の沈降速度の表式と Lin and Rood（1996）の移流スキームに基づくものである。

実装実験として、ダストの重力沈降過程と昨年度に導入したセミラグランジュ法物質移流スキームのテスト計算をおこなった。この実装実験では、地表面のダストフラックスとして水平方向に一様な値を与えた。地表面条件に関しては、Mars Global Surveyor（MGS）による観測から得られた地表面の熱慣性、アルベド、地形高度の水平分布を与えた。惑星半径、自転角速度、

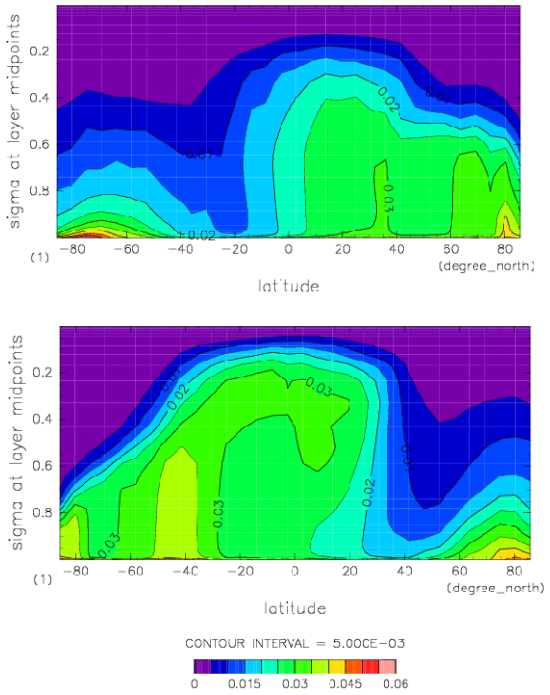

図 1　一様地表ダストフラックスを与えた場合に得られる東西平均ダスト量の子午面分布。（上図）北半球夏季における１ヶ月平均分布。（下図）北半球冬季における１ヶ月平均分布。単位は [kg/kg]。横軸は緯度、縦軸は σ である。

重力加速度などのパラメータについては、火星の値を用いた。実装実験の解像度は T21L36 とした。

図 1 に実装実験で得られた、北半球の夏季と冬季におけるダストの子午面分布を示す。大気最下層に与えられたダストが、両極冠の境界付近と夏半球の緯度４０度域において大気中層まで輸送される様子が示された。上記のダスト分布がどのように決定されているのかを明らかにするため、今後詳細な解析をおこなう予定である。また、実装実験の実行を通じて、過去の GCM 計算と同様の境界層の構造を得るためには、鉛直層内に 10 層程度の鉛直レベルを置くこと、乾燥対流調節を導入することの必要があることもわかった。

4.　今後の計画

現在、セミラグランジュ法物質移流スキームに加えて大規模風応力巻き上げスキームも入れた実装実験を実行中である。今後は、局所的な対流による巻き上げ過程として Renno et al. (1998) のスキームを実装し、ダスト過程に関するスキーム実装を完成させる。更に、実装したダスト過程の全てを用いた実装試験をおこない、観測との比較実験をおこなう。少なくとも T85L36 以上の高分解能実験を行い、ダスト動態の解像度依存性を明らかにする予定である。加えて、地球大気設定のテスト計算を実施し、水蒸気分布に対するセミラグランジュ法物質移流スキームの性能評価および問題点の洗い出しをおこなう。

5.　計算機資源の利用状況（2013 年 6 月～11 月）

実行ユーザ数: 4　CPU 時間 v_deb: 1.139 hours, v_cpu: 3,349.564 hours, v_8cpu: 0 hours, v_16cpu: 0 hours, 計: 3,350.706 hours

6.　昨年度研究課題のまとめ

6.1. 昨年度研究課題名

系外惑星大気シミュレーションモデルの開発: ダスト過程の実装と火星大気実験

6.2. 昨年度研究課題の目的

昨年度は、ダスト過程の実装に着手する前に、ダスト過程を全く入れない場合について火星大気の再現性を確認する実験の実施、火星ダスト過程に関するスキームおよび物質移流スキームの実装を進めることを目的とした。実際には、大規模風応力による巻き上げスキームの実装およびその実装実験と物質移流スキームの実装を行うことにとどまった。

6.3. 昨年度研究課題の成果概要

まず、ダスト過程をまったく入れないで、MGS の観測から得られたダストの鉛直分布を与えた、火星大気の再現性を確認する 5 火星年積分を実行した。表面温度、大気温度、子午面循環の季節変化パターンは、観測および過去の GCM 結果 (Kahre et al.、2006) とよく似たものとなっていることが確認された。

次に、大規模風応力巻き上げスキームの一つである KMH スキーム（Kahre et al., 2006）を導入した。このスキームを用いてダスト巻き上げフラックスを診断する 3 火星年の積分を行った。図 2 は、最後の 1 火星年で得られた、日平均東西平均したダスト巻き上げフラックスの季節変化を示したものである。横軸の Ls は、火星中心黄経（軌道上の火星の位置をあらわす角度）であり、Ls = 0, 90, 180, 270 はそれぞれ北半球の春分、夏至、秋分、冬至に対応する。ダスト巻き上げフラックスは、北半球の秋から冬にかけての北緯 50 度付近と南緯 30 度付近で、および北半球の春から夏にかけての南緯 50 度付近で増加する結果が得られた。これは過去の研究結果とも整合的なものである。

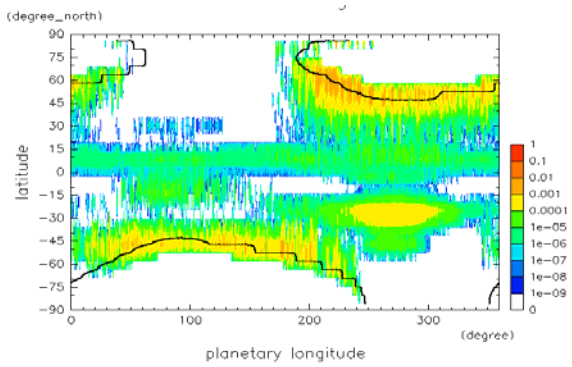

図 2 ダスト巻き上げ診断実験で得られた東西平均ダスト巻き上げフラックス　[Kg m^{-2} s^{-1}]。縦軸は緯度 [degree]、横軸は火星中心黄経 [degree] である。実線は極冠の境界をあらわす。

最後に、Kashimura et al（2013）のセミラグランジュ法物質移流スキームを dcpam5 に導入した。このスキームに関しては、理想的な計算設定を用いた試験実験ではその保存性が高いことを確認した。

6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数: 3　CPU 時間 1 ノード未満 : 872.318 hours, 1 ノード : 0 hours, 2 ノード : 0 hours, 計 : 872.318 hours